Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

+ *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.

+ *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.

+ *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.

+ *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página `http://books.google.com`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

Catalog J v v. 44.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Silv. P. Thompson

Heliogravure [illegible]

Digitized by Google

a. S.
Verlag von Wilhelm Knapp.
1894.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der

ELEKTROMAGNET

von

Silvanus P. Thompson, D. Sc.,
Direktor und Professor der Physik an der technischen Hochschule der Stadt und Gilden von London.

Deutsche Uebersetzung

von

C. Grawinkel.

Mit dem Bildniss des Verfassers und zahlreichen in den Text gedruckten Abbildungen.

Halle a. S.
Verlag von Wilhelm Knapp.
1894.

Digitized by Google

Digitized by Google

Inhaltsverzeichniss.

		Seite
Kapitel I.	**Geschichtliche Einleitung**	1
Kapitel II.	**Allgemeines über Elektromagnete und Elektromagnetismus, Formen der Elektromagnete, Materialien zur Herstellung von Elektromagneten**	33
	Verwendung im Allgemeinen	33
	Polarität	34
	Pole und Polflächen	35
	Magnetische Einheiten	37
	Formen der Elektromagnete	46
	Materialien zur Herstellung von Elektromagneten	54
Kapitel III.	**Eigenschaften des Eisens**	60
	Methoden zur Messung der Durchlässigkeit	63
	Grenzen der Durchlässigkeit und der Magnetisirung	73
	Wirkung eines Luftzwischenraumes im magnetischen Kreise	74
	Wirkung von Verbindungsstellen	78
	Wirkung des Druckes auf Verbindungsstellen	81
	Wirkungen der Spannung	81
	Wirkung der Schwingung	82
	Wirkungen der Erwärmung	82
	Zurückbleibender Magnetismus	84
	Hysteresis	86
	Kreisläufe der Magnetisirung	87
	Magnetisches Wachsthum	94
	Entmagnetisirung des Eisens	95
	Entmagnetisirende Wirkungen der Pole auf sich selbst. Eigenschaften kurzer Eisenstücke	95
	Ewing's Theorie der inducirten Magnetisirung	98
Kapitel IV.	**Grundgesetz des magnetischen Kreises**	100
	Gesetz der Tragkraft	105
	Magnetisirung und magnetische Tragkraft	106
	Anordnung von Elektromagneten auf Zug bei der Berührung von Pol und Anker	108
	Gewicht und Tragkraft von Magneten	112
	Berechnung der erforderlichen erregenden Kraft	114
	Wirkung der Verkleinerung der Polfläche	116
	Unterschied zwischen flachen und zugespitzten Polen	119
	Untersuchung der Vertheilung des Magnetismus auf Oberflächen	121

Digitized by Google

Wirkung fester, auf den Kernenden befindlicher Eisenmassen 124
Wirkung der Umkleidung eines Elektromagnetes . . 130
Kapitel V. Ausdehnung des Gesetzes des magnetischen Kreises auf Fälle der Anziehung eines Ankers aus der Entfernung 138
Untersuchung der Zerstreuung 147
Berechnung der Zerstreuung 151
Magnetischer Widerstand der Luft 155
Anwendung auf besondere Fälle 156
Unterschiede zwischen langen und kurzen Kernen . . 159
Fernere Versuchsangaben 160
Hohle Kerne im Gegensatz zu soliden Kernen . . . 161
Wirkung der Gestalt des Querschnittes 162
Wirkung des Abstandes der Pole 163
Untersuchungen von Hughes 163
Lage und Form des Ankers 165
Polansätze an Hufeisenmagneten 166
Kapitel VI. Regeln für die Wickelung der Kupferdrahtspulen . 167
Wickelung für gleichbleibende Spannung und Stromstärke 172
Verschiedene Regeln über die Wickelung 173
Verschiedene Arten der Wickelung 174
Wickelung in Abtheilungen 175
Trugschlüsse hinsichtlich der Wickelung 176
Isolation des Drahtes 176
Besondere Angaben 177
Über den Widerstand des Elektromagnetes und der Batterie 177
Wirkung der Ausdehnung einer Wickelung 178
Wirkung der Lage einer Wickelung 179
Missgriffe bei der Bauart 180
Beziehung des Widerstandes zur Masse der Wickelung und zur Stärke des Drahtes 182
Kapitel VII. Einzelheiten der Bauart 184
Gegensatz zwischen Elektromagneten und Dauermagneten 184
Elektromagnete für grösste Tragkraft 186
Elektromagnete für grösste Anziehung in die Ferne . 187
Elektromagnete ohne Eisen 187
Elektromagnete von geringstem Gewicht 188
Elektromagnete bei geringsten Beschaffungskosten . . 188
Elektromagnete zum Gebrauche bei schnell veränderlichen Strömen 191
Elektromagnete für schnellste Wirkung. Formel von Helmholtz 192
Zeitconstanten von Elektromagneten 195
Über die Verbindung der Spulen für schnellste Wirkung 198
Batterieschaltung zur Erzielung der schnellsten Wirkung 199

Digitized by Google

Zeitconstanten verschiedener Apparate 202
Relais der Britischen Telegraphen-Verwaltung . . . 203
Elektromagnete von Higgins 205
Kurze Kerne im Gegensatz zu langen Kernen . . . 206
Schnell wirkende Elektromagnete für Chronographen . 207
Ansteigen und Abnahme des Magnetismus 210

Kapitel VIII. Wickelung zum Eintauchen des Kernes 211
Berechnung der Wirkung der Spule auf den Kern zum Eintauchen 216
Hufeisenförmige Kerne zum Eintauchen 225
Versuchsangaben über Spulen mit Kern zum Eintauchen 225
Wirkung bei der Benutzung konischer Kerne zum Eintauchen 228
Massive und hohle Kerne zum Eintauchen 230
Andere Methoden zu Erweiterung des Wirkungsbereiches 230
Verschiedene Arten von Spulen mit Kern zum Eintauchen 232
Differentialwickelung mit Kern zum Eintauchen . . . 232
Spule und eine Spule zum Eintauchen 234
Abgetheilte Spule 234
Wirkung des magnetischen Feldes auf eine kleine Eisenkugel 235
Elektromagnet mit weitem Wirkungsbereich 236
Abgeschlossene Spulen 236

Kapitel IX. Elektromagnetische Apparate 239
Das allgemeine Gesetz elektromagnetischer Systeme . 242
Elektromagnete im Allgemeinen 245
Apparate, in denen Gegenkräfte verwendet werden . . 245
Abgleichung der Anziehung 246
Elektromagnetische Daumen 250
Elektromagnetische Gelenke 251
Apparate, die auf Abstossung gegründet sind . . . 253
Polarisirte Einrichtungen 255
Bewegliche Spule im dauernd magnetischen Felde . . 262
Apparate mit schwingenden Theilen 264
Apparate mit umlaufenden Theilen 264
Elektromagnetische Zahngetriebe 266
Magnetische Nebenschliessungen 267
Elektromagnetische Adhäsion 270
Scheidungsapparate 271
Apparate für Wechselstrom 278
Einrichtungen für Klingeln und Anzeiger 278

Kapitel X. Elektromagnetische Apparate mit schwingenden Theilen und elektromagnetische Pendel 282
Schwingende Vorrichtung für Inductionsspulen . . . 286
Elektromagnetische Stimmgabeln 287
Elektrische Pendel 290
Harmonische Telegraphenapparate 291

Digitized by Google

Kapitel XI. Elektromagnete für Wechselstrom 293
Art der Blätterung 293
Eigenschaften der Elektromagnete für Wechselstrom . 294
Versuche von Elihu Thomson 299
Scheinbarer Widerstand 305
Maxwell's Regel 305
Elektromagnete für Heizzwecke 311
Kapitel XII. Elektromagnetische Triebmaschinen 313
Kapitel XIII. Elektromagnetische Werkzeugmaschinen und verschiedene Anwendungen der Elektromagnete . . . 320
Kapitel XIV. Funkenbildung 325
Verhütung der Funkenbildung 325
Ursachen der Funkenbildung 325
Mechanische Einrichtungen zur Unterdrückung der Funken 327
Elektrische Einrichtungen zur Unterdrückung der Funken 328
Vergleich verschiedener Methoden 332
Ausgleich der Selbstinduction 333
Kapitel XV. Der Elektromagnetismus in der Heilkunst 334
Kapitel XVI. Dauermagnete 340
Beziehungen zwischen Dauermagnetismus und der chemischen Zusammensetzung des Materials . . . 344
Magnetisirungsmethoden 352
Beständigkeit der Magnete 355
Wirkungen der Temperatur 360
Verwendung geblätterter Magnete 362
Tragkraft oder Hebekraft von Magneten 363
Behandlung der Magnete 366
Unipolare Magnete 366
Astastische Anordnungen 367

Anhang.

I. William Sturgeon. Lebensabriss 369
II. Elektrische und magnetische Einheiten 376
III. Berechnungen der Erregung, Zerstreuung u. s. w. 385
IV. Grundgesetze des Elektromagnetismus 390
V. Über die Herstellung von Elektromagneten für Wechselstrom . . 407
VI. Tafel zur Berechnung der Drahtdurchmesser und der zulässigen Stromstärken 414
Sachregister 417

Digitized by Google

Vorbemerkung des Übersetzers.

Das Werk von Silvanus P. Thompson „Der Elektromagnet", das aus der erweiterten Bearbeitung einer Reihe von Vorlesungen — den sog. Cantor Lectures, von Cantor begründet — hervorgegangen ist, bietet dem Lernenden ein vorzügliches Lehrmittel, indem Thompson sämmtliche Auseinandersetzungen und Berechnungen auf den Begriff der magnetischen Kraftlinien und des magnetischen Kreises gründet, die Darlegungen elementar gestaltet und die neuesten Fortschritte auf dem Gebiete des Elektromagnetismus berücksichtigt hat. Hinsichtlich des klaren Aufbaues des Lehrgebäudes und der Darstellungsweise schliesst sich das neue Werk von Thompson würdig seinem Lehrbuch „Die Dynamo-Elektrischen Maschinen" an, sodass zu hoffen steht, das neue Werk werde ebenso günstig aufgenommen werden und ein nützliches Hülfsmittel für das Studium der Elektrotechnik sein.

Es möge auch bemerkt werden, dass das Lehrbuch von besonderem Nutzen für diejenigen sein wird, die sich dem Studium der Telegraphen- und Fernsprechtechnik widmen, da die Bedingungen für die in diesen Gebieten vorkommenden elektromagnetischen Apparate eingehende Berücksichtigung finden.

In verschiedenen Theilen bildet die deutsche Ausgabe mehr eine Bearbeitung als Übersetzung des englischen Textes, insofern als diejenigen Stellen, in denen sich der Verfasser in vortragender Weise an seine Zuhörer wendet, entsprechender Änderung unterzogen worden sind.

Ausserdem unterscheidet sich die deutsche Ausgabe von der englischen insofern, als eine Reihe vom Verfasser zur Verfügung gestellter Zusätze von Bedeutung bei der deutschen Bearbeitung berücksichtigt werden konnten.

Die Erweiterungen des Textes beziehen sich wesentlich auf das allgemeine Gesetz elektromagnetischer Systeme (Seite 242), elektromagnetische Zahngetriebe (Seite 266), Scheidungsapparate

Digitized by Google

(Seite 271), Elektromagnete für Wechselstrom (Seite 293) und Dauermagnete (Seite 340). Ferner ist der Anhang IV, Grundgesetze des Elektromagnetismus (Seite 390 bis 407) und Anhang V, Über die Herstellung von Elektromagneten für Wechselstrom hinzugetreten.

Die deutsche Ausgabe darf demnach als erweiterte und verbesserte Ausgabe bezeichnet werden.

Für die freundliche Überlassung der Zusätze spreche ich Herrn Professor Thompson hiermit meinen Dank aus.

Bei Vorbereitung der Übersetzung haben die Herren Schornack, Geheimer expedirender Sekretair im Reichs-Postamt und Döhn, Directionssekretair im Telegraphen-Ingenieur-Bureau des Reichs-Postamts, mitgewirkt. Die Verlagsbuchhandlung hat der Ausgabe ein wohlgetroffenes Bildniss des Verfassers beigegeben.

Berlin, Ostern, 1894.

Grawinkel.

Digitized by Google

Vorwort.

Der Elektromagnet wurde in praktischer Form zuerst am 23. Mai 1825 von William Sturgeon gelegentlich eines Vortrages vorgezeigt. Der Vortrag findet sich in dem Bande der Transactions of the Society of Arts für 1825. Mit Recht kann man dieser Erfindung den höchsten Platz einräumen. Das elektrische Ingenieurwesen umfasst viele Zweige, bei den meisten werden Elektromagnete benutzt. Die Dynamomaschine zum Erzeugen elektrischer Ströme, die Triebmaschine zur Umwandelung von Kraft in Arbeit, die elektrische Bogenlampe, der Wecker, das Telephon, die neueren elektrischen Maschinen für Bergwerkszwecke, und zum Trennen der Erze und viele andere elektromechanische Vorkehrungen fallen in das Gebiet. Bei diesen und vielen anderen Anwendungen der Elektricität bildet der Elektromagnet das Hauptorgan. Mit Hülfe des einfachen Apparates, Spule aus Kupferdraht mit Eisenkern, lassen sich mechanische Wirkungen in der Entfernung durch die Thätigkeit des elektrischen Stromes erzeugen. Die mechanischen Wirkungen ändern sich mit der Masse, Form und Güte des Eisenkernes, mit der Menge und Anordnung des als Wickelung dienenden Kupferdrahtes, mit der Strommenge in der Leitung, endlich mit der Form, Eigenschaft und Entfernung des Ankers. Aber die Gesetze hinsichtlich der Beziehungen der mechanischen Wirkung zu den verschiedenen Dingen, sind keineswegs sehr bekannt. Verschiedene waren lange streitig. Allmählich wird das früher Unklare und Unbestimmte klar und bestimmt. Das Gesetz des stetigen Verlaufes elektrischer Ströme, das früher unklar war, wurde durch die Entdeckung des Ohm'schen Gesetzes klargelegt. Die Anwendung des Gesetzes auf plötzlich unterbrochene Ströme, wie man sie beim Telegraphiren benutzt, wurde von Helmholtz gefunden. Maxwell ging zur weiteren Aus-

Digitized by Google

dehnung auf wechselnde oder Wellenströme über. Das Gesetz des Elektromagnetes war aber noch unentdeckt, der magnetische Theil der Aufgabe lag noch in Dunkelheit. Die einzige genaue Untersuchung über Magnetismus behandelte Aufgaben anderer Art, sie war in einer irreführenden Sprache niedergelegt; für die praktischen Aufgaben des Elektromagnetismus war die Untersuchung werthlos. Die Lehre von zwei über den Endoberflächen der Magnete vertheilten magnetischer Flüssigkeiten wurde unter Gutheissung von Autoritäten, wie Coulomb, Poisson und Laplace unglücklicherweise als ein feststehender Theil der Wissenschaft zusammen mit dem Gesetze der umgekehrten Quadrate angesehen. Wie sehr der Fortschritt der Wissenschaft durch das Gewicht jener grossen Namen behindert und verzögert wurde, lässt sich nicht mehr ermessen. Wir wissen jetzt, dass für alle Zwecke, mit Ausnahme solcher, deren Werth auf dem Gebiete der abstrakten Mathematik liegt, die Lehre von den zwei Flüssigkeiten falsch und irreführend ist. Wir wissen, dass der Magnetismus sich nicht an den Enden oder der Oberfläche des Magnetes aufhält, sondern in der ganzen Masse vertheilt ist; dass die innere, nicht die äussere Magnetisirung als die wichtigste Thatsache gilt, dass der sogenannte freie Magnetismus an der Oberfläche eine zufällige Erscheinung ist, dass der Magnet dort am stärksten erregt ist, wo die geringste Oberflächen-Erregung sich zeigt, dass endlich die Lehre von der Vertheilung der Flüssigkeiten auf der Oberfläche ungeeignet ist, um eine Grundlage zur Berechnung abzugeben. Man braucht nicht allein Regeln zur Berechnung der Tragkraft eines gegebenen Elektromagnetes, sondern auch Anleitungen zum Entwurf und Bau von Elektromagneten besonderer Form, die für die verschiedenen in der Praxis vorkommenden Fälle passen. An einer Stelle braucht man einen starken Elektromagnet, der an seinem Anker sehr fest hält; im anderen Falle wird ein Magnet mit einem sehr grossen Anziehungsbereich gewünscht; es bedarf ferner einer besonderen Form bei schnellster Wirkung oder der höchsten Wirkung bei geringstem Gewicht. Bei der Lösung solcher Aufgaben bietet die alte Theorie des Magnetismus nicht die mindeste Hülfe.

Allmählich erhellt sich das Dunkel. Es wurde gebräuchlich, den Magnetismus eines Magnetes als etwas zu betrachten, dass auf bestimmten Wegen fliesst, auch leichter durch Stoffe wie Eisen als durch andere verhältnissmässig nicht magnetische Materialien fliesst. Vergleiche zwischen dem Fliessen der Elektricität in einem

Digitized by Google

elektrisch leitenden Stromkreise und dem Durchgange magnetischer Kraftlinien durch Kreise mit magnetischer Leitungsfähigkeit drängten sich selbst dem Geiste der Beobachter auf und führten zu ganz anderen Begriffsauffassungen. Schon im Jahre 1821 stellte Cumming[1]) Versuche über magnetische Leitungsfähigkeit an. Die Auffassung des magnetischen Kreises war Ritchie[2]), Sturgeon[3]), Dove[4]), Dub[5]) und De la Rive[6]) mehr oder weniger geläufig; der Letztgenannte braucht ausdrücklich die Bezeichnung „ein geschlossener magnetischer Kreis". Joule[7]) fand, dass das Maximum der Kraft eines Elektromagnetes proportional dem kleinsten Querschnitt des ganzen magnetischen Kreises sei, und betrachtete den Widerstand gegen die Induction proportional der Länge des magnetischen Kreises. In Joules Schriften über Magnetismus kann man fünf oder sechs Sätze finden, die zusammengestellt eine vollendete Bestätigung der Sache ausmachen. Faraday[8]) nimmt für sich den Beweis in Anspruch, dass jede magnetische Kraftlinie eine geschlossene Curve darstellt, dass der Weg dieser geschlossenen Curven von der magnetischen Leitungsfähigkeit der benachbarten Massen abhänge, und dass die magnetischen Kraftlinien den Linien der elektrischen Strömung in einem elektrischen Stromkreise ähnlich sind. Er sprach davon, dass ein von Luft umgebener Magnet etwa wie eine in Wasser oder einem anderen Elektrolyt versenkte galvanische Batterie zu betrachten sei. Er erkannte sogar das Vorhandensein einer Kraft, ähnlich der elektromotorischen Kraft in einem elektrischen Stromkreise; der Name „magnetomotorische Kraft" ist jedoch neueren Ursprungs. Die Bezeichnung „magnetische Leitungsfähigkeit" kann man in Maxwells Werk (Bd. II S. 51) jedoch nur kurz erwähnt finden. Im Jahre 1873 nahm Rowland[9]) ausdrücklich die Begründung und den Wortlaut von Faradays Methode an und stellte fest, dass

1) Camb. Phil. Trans 2. April 1821.

2) Phil. Mag. Serie III Bd. III S. 122.

3) Ann. of Electr. XII S. 217.

4) Pogg. Ann. XXIX S. 462 1833. Vergl. auch Pogg. Ann. XLIII S. 517 1838.

5) Dub, Elektromagnetismus (Ausg. 1861) S. 401 und Pogg. Ann. XC S. 440 1853.

6) De la Rive, Treatise on Electricity (Walkers Übersetzung Bd. I S. 292).

7) Ann. of Electr. IV 59 1839; V 195 1841 und Scientific Papers S. 8, 34, 35, 36.

8) Experimental Researches Bd. III Art. 3117, 3228, 3230, 3260, 3171, 3276, 3294 und 3361.

9) Phil. Mag. Serie IV Bd. XLVI August 1813 Über magnetische Durchlässigkeit und das Maximum des Magnetismus von Eisen, Stahl und Nickel.

Digitized by Google

die Strömung magnetischer Kraftlinien durch einen Stab einer genauen Berechnung unterzogen werden könne; das Elementargesetz, sagt er, „ist dem Ohm'schen Gesetze ähnlich". Nach Rowlands Angabe müsste die magnetisirende Kraft einer Spule durch den Widerstand, der den Kraftlinien geboten wird, dividirt werden; eine Rechnung für magnetische Kreise, die dem Ohm'schen Gesetz für elektrische Stromkreise entspricht. Er wendete die Berechnung zur Bestimmung der Durchlässigkeit bestimmter Sorten Eisen, Stahl und Nickel an. In den Jahren 1882[1]) und 1883 stellte R. H. M. Bosanquet[2]) eine ähnliche Beweisführung auf, wobei er den passenden Ausdruck „magnetomotorische Kraft" benutzte, um die Kraft zu bezeichnen, welche die magnetischen Inductionslinien durch „den magnetischen Widerstand" des Kreises zu treiben sucht. In diesen Abhandlungen sind die Berechnungen auf ein System zurückgeführt und behandeln nicht nur die besonderen Eigenschaften des Eisens, sondern auch Aufgaben, die aus der Form des Eisens sich ergeben. Bosanquet zeigt, wie die verschiedenen Widerstände der einzelnen Theile des Kreises zu berechnen sind, er addirt sie, um den Gesammtwiderstand des magnetischen Kreises zu finden.

Früher als Bosanquet hatten Lord Elphinstone und Vincent den Begriff des magnetischen Kreises aufgenommen, sie schlugen seine Verwendung beim Bau dynamoelektrischer Maschinen vor. Bei zwei Gelegenheiten[3]) theilten sie der Royal Society die Ergebnisse von Versuchen mit und zeigten, dass derselbe erregende Strom in einer gegebenen Eisenform eine grössere Menge Magnetismus hervorbringen würde, wenn diese einen geschlossenen magnetischen Stromkreis bilde, als wenn die Masse anders angeordnet wäre.

In letzter Zeit ist der Begriff von dem magnetischen Kreise durch die Erfinder von Dynamomaschinen sehr entwickelt worden. Die Berechnung der Entwürfe von Maschinen beruht auf diesem Grundsatz. Bei Anwendung desselben braucht man keine Gesetze der umgekehrten Quadrate der Entfernungen, keine magnetischen

1) Proc. Roy. Soc. XXIV S. 445 December 1882.

2) Phil. Mag. Serie V Bd. XV S. 205 März 1883. Über Magnetomotorische Kraft. Auch ebenda Bd. XIX Februar 1885 und Proc. Roy. Soc. No. 223 1883. Vergl. auch Electrician XIV S. 291 14. Februar 1885.

3) Proc. Roy. Soc. XXIX S. 292 1879 und XXX S. 287 1880. Vergl. auch Electrical Review VIII S. 134. 1880.

Digitized by Google

Momente, keine Ausdrücke für Oberflächenvertheilung des Magnetismus. Das einfache Gesetz des magnetischen Kreises und die Kenntniss von den Eigenschaften des Eisens ist Alles, was nothwendig wird. Vor ungefähr vier Jahren wurde von Gisbert Kapp[1]) und den D. D. J. und E. Hopkinson[2]) in Anwendung dieser Thatsachen für den Entwurf von Dynamomaschinen viel geleistet; früher waren es Sachen der empirischen Praxis. Die Formeln von Forbes[3]) zur Berechnung der magnetischen Zerstreuung sowie die Untersuchungen von Ayrton und Perry[4]) über magnetische Nebenschlüsse gewährten wesentliche Hülfe. Das Ergebniss der Fortschritte war, dass das Entwerfen von Dynamomaschinen sich zur exakten Wissenschaft ausbildete.

Zweck und Ziel des vorliegenden Werkes ist es, zu zeigen, wie dieselben Beobachtungen, die mit so grossem Erfolge bei dem Entwerfen von Dynamomaschinen Verwendung gefunden haben, beim Studium des Elektromagnetes überhaupt zur Geltung gebracht werden. Theorie und Praxis des Entwerfens und des Baues des Elektromagnetes soll ein für alle Male auf eine rationelle Grundlage gestellt werden. Bestimmte Regeln werden zur Anleitung des Erbauers angegeben, die ihn bei der Wahl der geeigneten Abmessungen und der Form des Eisens sowohl, als auch zur Erlangung der passenden Form und Menge des Kupferdrahts leiten sollen. Im Kapitel I ist ein geschichtlicher Überblick über die Erfindung enthalten. Es folgt ein Kapitel über Verwendungen und Formen der Elektromagnete und über elektromagnetische Erscheinungen im Allgemeinen. Das Kapitel III bietet eine Abhandlung über magnetische Eigenschaften des Eisens und Stahles, sowie anderer Materialien; hieran schliessen sich Bemerkungen über die Methoden zur Bestimmung der magnetischen Durchlässigkeit verschiedener Eisenbrände bei verschiedenen Sättigungsgraden. Über die von verschiedenen Beobachtern gefundenen Werthe sind Tabellen zusammengestellt. In Verbindung mit den magnetischen Eigenschaften des Eisens wird auch die magnetische Hysteresis erörtert.

Im Kapitel IV wird die Lehre vom magnetischen Kreise mit Zahlenbeispielen und einer Anzahl Beobachtungsangaben über die

1) The Electrician Bd. XIV, XV und XVI 1885—86 auch Proc. Inst. Civil Eng. LXXXIII 1885—86 und Journ. Soc. Teleg. Engineers XV 524 1886.

2) Phil. Trans. 1886 S. 331 und The Electrician XVIII S. 39, 63, 86 1886.

3) Journ. Soc. Telegr. Engineers XV 555. 1886.

4) Ebenda XV 530 1886.

Digitized by Google

Leistung von Elektromagneten, insbesondere solcher, die auf die Zugkraft von Elektromagneten Bezug haben, erläutert. Ferner ist das Gesetz der Zugkraft zwischen Elektromagnet und Anker angegeben, dann folgen die Regeln zur Bestimmung der Eisenkerne und Kupferwickelungen, die zur Hervorbringung einer vorgeschriebenen Zugkraft erforderlich sind. Im Kapitel V wird die Berechnung des magnetischen Kreises auf solche Fälle ausgedehnt, in denen ein Luftzwischenraum zwischen den Polen des Magnetes und seinem Anker vorhanden ist, und wo daher ein Nebenschluss für die magnetischen Linien von Pol zu Pol besteht. Kapitel VI ist den Regeln zur Berechnung der Windungen der Kupferspulen gewidmet, ferner wird die Beziehung zwischen der erregenden Kraft der Spule und der Wärmewirkung des Stromes festgestellt. Kapitel VII enthält eine eingehende Erörterung der besonderen Verschiedenheiten der Form, die man Elektromagneten für besondere Zwecke geben muss Elektromagnete für grösste Tragkraft, für schnellste Wirkung, für den grössten Wirkungsbereich, für grösste Wirthlichkeit bei fortgesetztem täglichem Gebrauche, zum Arbeiten in Reihe bei Gleichstrom, zum Gebrauch in Nebeneinanderschaltung bei gleichbleibender Spannung, endlich solche zum Betriebe mit Wechselströmen werden näher erläutert.

Am Schlusse des Buches wird Aufklärung über die verschiedenen Formen elektromagnetischer Apparate, die in Verbindung mit der Erfindung des Elektromagnetes entstanden sind, gegeben. Im Kapitel VIII wird die Wickelung mit eintauchendem Kern besonders betrachtet, weil sie eine besondere Art Elektromagnet für einen grossen Bewegungsbereich darstellt. Kapitel IX ist elektrischen Apparaten gewidmet, dabei sind auch verschiedene Arten, wie man mechanisch einen grossen Bewegungsbereich für Elektromagnete herstellt und ihre Anziehung in dem Bereiche gleichmässig gestaltet, beschrieben. Bei der Entwickelung dieses Gegenstandes werden Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen elektrisch-mechanischen Bewegungen und den gewöhnlichen mechanischen Bewegungen hervorgehoben. Kapitel X handelt von elektromagnetischen Apparaten mit schwingenden Theilen, Kapitel XI von Elektromagneten für Wechselstrom, Kapitel XII von Triebmaschinen, Kapitel XIII von elektromagnetischen Werkzeugmaschinen, Kapitel XIV enthält eine Betrachtung der Arten, wie Funken in Stromkreisen mit Elektromagneten verhindert oder vermindert werden. Kapitel XV handelt über den Gebrauch des

Digitized by Google

Elektromagnetes in der Wundheilkunde. Hierzu hat der Bruder des Verfassers, Dr. J. Tatham Thompson in Cardiff wesentlich beigetragen. Kapitel XVI, mit dem das Buch schliesst, beschäftigt sich mit Dauermagneten aus Stahl.

Das Buch bildet eine Erweiterung der Cantor Lectures, die vom Verfasser im Jahre 1890 vor der Society of Arts gehalten wurden. Er stattet dem Vorstand der Gesellschaft für die Erlaubniss zur Benutzung des Textes und der Holzschnitte hiermit seinen Dank ab. Das Kapitel über elektromagnetische Apparate bildet den Hauptgegenstand der Präsidentenrede des Autors bei der Junior Engineering Society.

Dem Prof. R. Mullineux Walmsley, sowie Mr. Eustace Thomas vom Technical College möge für ihre Hülfe bei Vorbereitung und Durchsicht des Buches an dieser Stelle Dank abgestattet werden.

Da die Cantor Lectures sowohl in England als in den Vereinigten Staaten mit Beifall aufgenommen worden sind, so hofft der Verfasser, dass sie in der vorliegenden erweiterten Form sich sowohl denjenigen nützlich erweisen werden, die in der elektrischen Industrie beschäftigt sind, als auch denjenigen, die die Wissenschaft um ihrer selbst willen pflegen.

Juli 1891.

City and Guild's Technical College Finsbury.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der Elektromagnet.

Kapitel I.

Geschichtliche Einleitung.

Die Wirkung des durch einen Draht fliessenden elektrischen Stromes auf eine benachbarte Compassnadel wurde von Oerstedt im Jahre 1820 entdeckt[1]). Dieser ersten Bekanntgabe der einem elektrischen Strome beiwohnenden magnetischen Eigenschaften folgten schnell die Untersuchungen von Ampère[2]), Arago[3]), Davy[4]), sowie die von verschiedenen Andern angegebenen Versuchsanordnungen: de la Rive's[5]) schwimmende Batterie und Spule, Schweigger's[6]) Multiplicator, Cumming's[7]) Galvanometer, Faraday's[8]) Apparat zum Umlauf eines Dauermagnetes, Marsh's[9]) schwingendes Pendel und Barlow's[10]) umlaufendes Stern-Rad. Jedoch wurde erst im Jahre 1825 der Elektromagnet erfunden. Arago veröffentlichte am 25. September 1820, dass ein die Pole einer Volta-Säule verbindender Kupferdraht, der also von einem elektrischen Strome durchflossen wurde, im Stande sei, Eisenfeilspäne anzuziehen.

In derselben Abhandlung beschrieb er, wie es ihm gelungen sei, rechtwinklig zum Kupferdraht gelegten Stahlnadeln Magnetismus mitzutheilen; als er Ampère den Versuch vorführte, meinte dieser, die magnetische Wirkung würde kräftiger sein,

---

1) Vgl. Thomson's Ann. of Philosophy, Okt. 1820; die Uebersetzung der Originalabhandlung findet sich im Journ. Soc. Telegr. Engineers S. 464, 1876.
2) Ann. de Chim. et de Physique XV, S. 59 und 170, 1820.
3) Ebenda XV. S. 93, 1820.
4) Phil. Transact. 1821.
5) Biblioth. Universelle März 1821.
6) Ebenda.
7) Camb. Phil. Trans. 1821.
8) Quarterly Journ. of Science, Sept. 1821.
9) Barlow's Magnetic Attractions, 2. Ausgabe 1823.
10) Ebenda.

Digitized by Google

wenn an Stelle des geraden Kupferdrahtes ein schraubenförmig gewundener Draht zur Verwendung gelangte und die Nadel in der Mitte der Spirale sich befände. Nach diesem Vorschlage wurde von den beiden Gelehrten gleichzeitig verfahren. Ein Kupferdraht wurde spiralig geformt, seine beiden gerade gelassenen Enden konnten mit den Polen einer kräftigen, horizontal angeordneten Volta-Säule verbunden werden; eine in Papier gewickelte stählerne Nadel wurde in die Spirale eingeführt. Nachdem die Stahlnadel einige Minuten in der Spirale belassen war, hatte sie ziemlich starken Magnetismus erhalten.

Arago wickelte nun auf einem Glasrohr einige kurze Drahtspiralen von je 5,7 *cm* Länge, abwechselnd rechts- und linksgängig auf. Wenn er nunmehr in das Glasrohr einen Stahldraht steckte, so konnte er an den Stellen, wo der Windungsgang wechselte, „Folgepole" hervorbringen. Am 23. Oktober 1820 trug Ampère eine Abhandlung vor, worin er behauptete, dass diese Thatsachen seine Theorie der magnetischen Wirkungen bestätigten. Auch Davy hatte im Jahre 1820 stählerne Nadeln, mit denen er Versuche anstellte, zeitweise mit Drahtwickelungen umgeben und gezeigt, dass die Strömung der Elektricität in der Spule geeignet sei, magnetische Kraft auf die Nadeln zu übertragen. Von diesen Versuchen war es ein grosser Schritt vorwärts bis zu der Entdeckung, dass ein mit geeigneter Kupferdrahtwickelung umgebener weicher Eisenkern nicht nur zu einem kräftigen Magnet gemacht werden, sondern dass man dessen Kraftäusserung auch nach Belieben aufhören oder beginnen lassen kann, dass sich die Kraft bis zu einem gewünschten Grade steigern lässt, dass man endlich die magnetische Thätigkeit aus praktisch unbegrenzter Entfernung hervorrufen und beherrschen kann. Die Elektromagnetform, der man solche Eigenschaften zuerst zusprechen kann, wurde von William Sturgeon[1]) angegeben und in seiner, der Society of Arts im Jahre 1825 vorgetragenen Abhandlung beschrieben.

Er führte dabei eine Reihe verbesserter Apparate zu elektromagnetischen Versuchen vor[2]). Unter diesen Apparaten befinden sich zwei Elektromagnete, und zwar ein Hufeisenmagnet und ein Stabmagnet.

---

1) Vgl. Anhang A, die biographische Notiz über Sturgeon.

2) Trans. Soc. of Arts 1825, XLIII, S. 38.

Digitized by Google

Die Figuren 1 und 2 zeigen den aus einem gebogenen Eisenstabe bestehenden Elektromagnet. Der Stab war etwa 0,3 *m* lang und 12,5 *mm* stark, mit Firniss überzogen und mit einer linksgängigen Spirale aus starkem blanken Kupferdraht in 18 Windungen umgeben. Sturgeon fand diese Wickelung passend für die besondere Batterie, deren Anwenduug er vorzog; sie bestand aus einer einzigen Zelle, in der sich, spiralig zusammengerollt, ein Paar grosser Zink- und Kupferplatten (etwa 839 *qcm* gross) in Säure eingetaucht befanden. Diese Zelle besass einen geringen innern Widerstand und lieferte bei der Verbindung mit einem äusseren Kreise von geringem

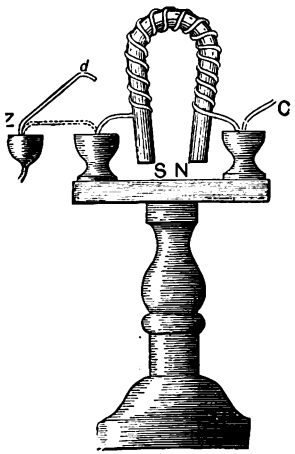


Fig. 1.

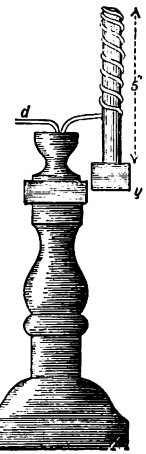


Fig. 2.

Widerstand eine beträchtliche Strommenge. Die Enden des Kupferdrahtes waren seitwärts abgeführt, nach unten gebogen und tauchten in zwei tiefe Contactnäpfe, die auf einer hölzernen Unterlage befestigt waren. Diese aus Holz bestehenden Näpfe dienten zugleich als Stützpunkte für den Elektromagnet und nach Füllung mit Quecksilber zugleich zur Herstellung leitender Verbindungen.

Die Figur 2 stellt den Magnet von der Seite gesehen und einen Eisenstab *y* tragend dar. Der Stromkreis der Batterie wurde durch den Verbindungsdraht *d* geschlossen; wurde letzterer aus dem Napf *Z* entfernt, so war der Stromkreis unterbrochen und das Gewicht (*y*) fiel ab. Sturgeon fügte in seinen erklärenden Bemerkungen hinzu, dass die Magnetpole *N* und *S* sich umkehrten, sobald der Kupferdraht um den Stab anstatt

Digitized by Google

linksgängig, rechtsgängig umgewickelt werde oder noch einfacher dadurch, dass man die Verbindungen mit der Batterie umkehre, indem man den in *Z* eintauchenden Draht mit dem in *C* eintauchenden vertausche. Wurde der Elektromagnet, wie beschrieben, erregt, so vermochte er ein Gewicht von 4 *kg* zu tragen.

Die Figur 3 zeigt eine anderweite Anordnung, um gehärteten Stahlstäben nach ihrer Einlagerung Magnetismus mitzutheilen oder weiches Eisen zeitweise magnetisch zu machen; die Einrichtung unterscheidet sich von der in den Figuren 1 und 2 dargestellten nur dadurch, dass die Spirale gerade gestreckt ist und Stahl- oder Eisenstäbe ein- und auszuführen gestattet.

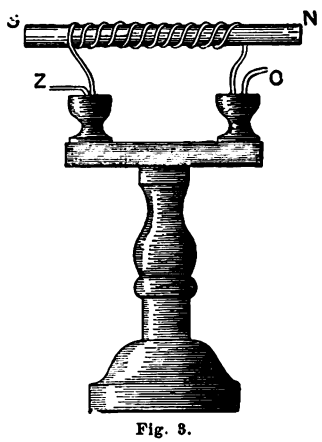


Fig. 3.

Sturgeon übergab als Dank für die Zuertheilung der Medaille und des Preises der Gesellschaft alle die in den Verhandlungen der letzteren im Jahre 1825 beschriebenen Apparate dem Gesellschafts-Museum, das deshalb als stolzer Besitzer des ersten Elektromagnetes angesehen werden könnte. Bei der Unbeständigkeit der menschlichen Dinge ist indessen das Gesellschafts-Museum der Apparate längst aufgelöst; die werthvolle Reliquie ging entweder in das nunmehr auch verschwundene Museum des Patentamtes über oder ist sonst abhanden gekommen.

Sturgeon's erster Elektromagnet, dessen Kern nur etwa 0,2 *kg* wog, vermochte etwa 4 *kg*, also sein 20faches Eigengewicht zu tragen. Zur damaligen Zeit wurde er als wirklich vollendeter Apparat betrachtet. Die eine Lage starken Kupferdrahtes war der angewendeten einzelnen Batteriezelle zweckmässig angepasst. Dasselbe Kupfergewicht, als feiner Draht gestaltet, würde kein besseres Ergebniss erzielt haben. In der Behandlung von Joule trug derselbe Elektromagnet später ein Gewicht von 22,7 *kg* oder sein 114faches Eigengewicht.

Ueber seine Apparate aus dem Jahre 1825 schrieb Sturgeon 1832 Folgendes in etwas prahlerischer Schreibart:

„Als ich zuerst nachwies, dass die magnetische Energie eines galvanischen Leiters sich deutlicher durch Einwirkung auf weiches Eisen

Digitized by Google

als auf harten Stahl zeigt, beschränkten sich meine Versuche auf kleine Massen, in der Regel auf einen Eisenstab von wenigen Zollen Länge und etwa einem halben Zoll Durchmesser. Einige Versuchsstäbe waren gerade, andere in Form eines Hufeisenmagnetes gebogen, jeder Versuchsstab war von einem spiralförmigen Kupferdraht umgeben. Die von diesen einfachen Vorrichtungen entwickelte magnetische Energie war sehr ausgezeichnet und grossartig, wie sich herausstellte, als ein beträchtliches Gewicht während der Erregung durch die elektrische Influenz an den Polen festgehalten wurde.

Eine beispiellose Uebertragung magnetischer Thätigkeit wird in weichem Eisen sowohl durch plötzlichen Uebergang aus einem Zustande gänzlicher Unthätigkeit zu dem Zustande kräftiger Polarität dargelegt, als auch durch gleichzeitige Gegenseitigkeit der Polarität an den Enden des Stabes. — Wandelbarkeiten auf diesem Gebiete der Physik, für derer Entfaltung weiches Eisen ganz besonders geeignet ist. Durch die Wirkung der Elektricität erfolgen die Umwandlungen erweislich mit Gedankenschnelle und werden durch sehr glänzende magnetische Versuche klar gelegt.

Ausserdem wird hinlänglich durch viele Versuche bewiesen, dass die galvanische Elektricität in hohem Grade auf den latenten Magnetismus des weichen Eisens einwirkt und dessen verborgene Kräfte mit erstaunlicher Geschwindigkeit hervorruft und zwar bis zu einem Wirkungsgrade, der Alles übertrifft, was man durch irgend eine bekannte Anwendung des stärksten Dauermagnetes erreichen oder durch irgend eine andere Versuchsweise bis jetzt entdecken konnte.

Indessen ist bei Versuchsstücken verschiedenen Ursprungs bemerkt worden, dass ungeachtet der Anwendung grösster Sorgfalt, ihnen gleiche Form und Abmessungen zu geben, doch ein wesentlicher Unterschied in der Aufnahmefähigkeit erscheint, die von den Stücken einzeln bei Entwickelung der magnetischen Kraft nachgewiesen wird. Vieles hängt in dieser Beziehung von der Behandlung beim Schmieden ab, ebenso auch von dem natürlichen Charakter des Eisens selbst [1]).

Die höchste Stärke von Elektromagneten, sowie die Leichtigkeit und Geschwindigkeit, mit der ihre Energie in Wirksamkeit gebracht werden kann, bieten vorzügliche Eigenschaften zur Anwendung bei einer Reihe von Einrichtungen, in denen kräftige Magnete wirksam arbeiten und einen hervorragenden Antheil an der Hervorbringung elektromagnetischen Umlaufes haben; während die mögliche Wandelbarkeit der Polarität ausgezeichnet berechnet ist, um eine befriedigende Mannigfaltigkeit bei

1) Aus einer Anzahl von Versuchen an kleinen Stücken scheint hervorzugehen, dass starkes Hämmern sehr schädlich für die Entwickelung des Magnetismus in weichem Eisen ist, sei nun die erregende Ursache galvanisch oder eine andere. Obgleich gutes Ausglühen stets wirksam ist und das Auftreten der Polarität in hohem Grade erleichtert, so vermag diese Behandlung den Grad der Aufnahmefähigkeit doch nicht wiederherzustellen, den das Eisen beim Hämmern häufig verliert. Cylindrische Stäbe von kleinen Abmessungen können leicht in die gewünschte Form ohne Hämmern gebogen werden; ich fand, dass in solcher Weise gebogene kleine Elektromagnete die magnetischen Kräfte in einem sehr hohen Grade entfalten.

Digitized by Google

Darstellung jener hoch interessanten Klasse von Erscheinungen zu bieten und auf andere hinzuführen, die durch irgend welche andere Hülfsmittel nicht nachgeahmt werden können [1]).

Die weiteren Arbeiten von Sturgeon während der folgenden drei Jahre werden am besten mit seinen eignen Worten beschrieben:

„Seit jener Zeit, in der meine Versuche in den Transactions of the Society of Arts u. s. w. für 1825 veröffentlicht wurden, bis zum Schlusse des Jahres 1828, scheinen keine andern eingehenden Versuche angestellt worden zu sein, um die Anziehungskraft von Elektromagneten zu verbessern. Der Mechaniker M. Watkins zu Charing Cross hatte allerdings bedeutend grössere Elektromagnete, als ich benutzte, angefertigt, nur ist unbekannt geblieben, welche Ausdehnung sein Versuch genommen hat.

Im Jahre 1828 kaufte Prof. Moll aus Utrecht, der sich zum Besuch in London befand, von Watkins einen Elektromagnet im Gewicht von 2,3 *kg*. Damals war meiner Ansicht nach dies der grösste, der angefertigt war. Er bestand aus rundem Eisen von etwa 25 *mm* Durchmesser und war mit einem Kupferdraht in 38 Windungen umgeben. Bei starker Erregung besass er eine Tragkraft von 34 *kg*. Später richtete Prof. Moll einen andern gebogenen Elektromagnet her, der 31,8 *cm* hoch war, 6,4 *cm* im Durchmesser besass und etwa 11,8 *kg* wog; er war, wie der vorher beschriebene, ebenfalls mit einer einzelnen Spirale umgeben. Mittels einer wirksamen galvanischen Fläche von 1,02 *qm* konnte dieser Elektromagnet 70 *kg* tragen, aber man konnte mit ihm keinen Amboss im Gewicht von 81 *kg* heben. Der grösste Elektromagnet, den ich noch (1832) in meinen Vorlesungen vorzeige, wiegt 7,3 *kg*. Er ist aus einem Stabe weichen Eisens hergestellt, 3,81 *cm* auf jeder Seite stark; das die Pole verbindende Querstück besteht aus demselben Eisen und ist etwa 9,5 *cm* lang.

Zwanzig besondere Kupferdrähte von je 15 *m* Länge sind, ein Draht über den andern, von Pol zu Pol aufgespult und von einander durch Zwischenlagen aus Seide getrennt; die erste Spule ist nur um die Dicke einer Seidenlage vom Eisen entfernt, die 20ste, die zu äusserst liegt, etwa 13 *mm* weit. Die Drähte sind in solcher Weise vollständig untereinander isoloirt, ohne dass man sie mit Zwirn oder Firniss zu bedecken braucht. Um bequem Verbindungen herstellen zu können, ragen die Drahtenden etwa 0,6 *m* vor. Mit einer meiner kleinen Cylinder-Batterien von etwa 970 *qcm* gesammter Oberfläche erregt, trägt dieser Elektromagnet 181 *kg*. Ich habe mit einer grösseren Batterie Versuche angestellt, es scheint indessen deren Energie sich nicht in dem Maasse zu erhöhen, als man mit Rücksicht auf die Vergrösserung der Oberfläche erwarten sollte. Viel hängt von einer guten sauren Lösung ab; gute Salpetersäure mit ungefähr der sechs- bis achtfachen Menge Wasser ist sehr geeignet. Mit einer neuen Batterie von den oben angegebenen Abmessungen und

1) Sturgeon's Scientific Researches, S. 113.

Digitized by Google

einer starken Lösung von Salz in Wasser bei einer Temperatur von 190° F, trug der Elektromagnet 32—36 *kg*. Befänden sich nur die drei äusseren Spulen im Stromkreis, so würde er gerade den Anker oder das Querstück tragen. Betrug die Temperatur der Lösung 40°—50° F, so war die erregte magnetische Kraft verhältnissmässig gering. Wurde die innerste Wickelung allein eingeschaltet und eine stark saure Lösung verwendet, so trug der Elektromagnet etwa 45 *kg*, bei Einschaltung der vier äussersten Drahtlagen aber 113 *kg*. Mit jeder hinzugefügten Wickelung bis zur zwölften stieg seine Kraft, mit einer weiteren Wickelung, aber nicht merklich, die andern Wickelungen scheinen daher nutzlos zu sein, obgleich die drei letzten, unabhängig von den 17 innere und bei einem Abstande von $12^1/_2$ *mm* vom Eisen, in letzterem eine Anziehungskraft von 34 *kg* hervorbringen. „Mr. Marsh" hat einem weit grösseren Eisenstab als den meinigen zugerichtet und die leitenden Drähte in ähnlicher Weise vertheilt, wie dies von Professor Henry angegeben und mit Erfolg durchgeführt worden war.

Ich halte dafür, dass diese beiden Elektromagnete die kräftigsten sind, die jemals in unserm Lande hergestellt wurden.

Ein kleiner, von mir zu Vorlesungszwecken benutzter Elektromagnet, sowie die Art seiner Aufhängung ist in der Tafel VI dargestellt (Fig. 4).

„Der Magnet besteht aus einem cylindrischen Eisenstabe von 112 *gr* Gewicht, die Pole stehen etwa 6 *mm* von einander. Er ist mit sechs Wickelungen in ähnlicher Weise wie der grosse vorhin beschriebene Elektromagnet umgeben und besitzt eine Tragkraft bis zu 23 *kg*.

Zur Aufhängung des Magnetes bei den Versuchen finde ich ein dreiseitiges Gestell sehr passend. Ein dünnes, zwei hölzerne Näpfe tragendes Brett wird in entsprechender Höhe an zwei Beinen des Gestelles befestigt. Die beiden Gefässe werden mit Quecksilber gefüllt, die abwärts ragenden Enden der Wickelung tauchen in das Quecksilber.

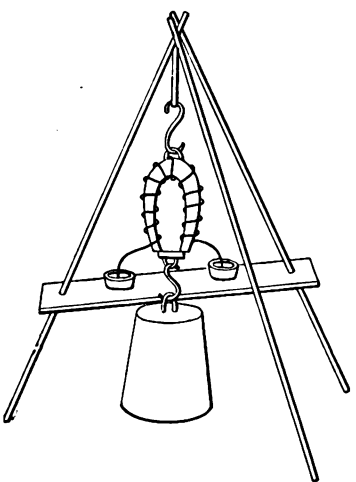


Fig. 4.

Die Gefässe besitzen hinreichende Weite, um eine beträchtliche Hin- und Herbewegung der Drähte ohne Unterbrechung des Contactes zu gestatten, denn die Bewegung tritt infolge der Schwingungen des Magnetes und Anziehen des Gewichtes häufig ein. Der Stromkreis wird durch andere Drähte geschlossen, die eine Verbindung der Batterie mit den beiden Quecksilbernäpfen herstellen. Wird das Gewicht, wie in der Figur angedeutet, vom Elektromagnet getragen und bringt man dann durch Entfernung eines der Verbindungsdrähte eine Unterbrechung

Digitized by Google

hervor, so fällt das Gewicht plötzlich ab. Den grossen Magnet hänge ich in derselben Weise an einem grösseren Gestell auf; die zu tragenden Gewichte werden nacheinander auf ein quadratisches Brett gelegt. Dasselbe ist mittels einer Schnur an jedem Ende des Querstückes befestigt, das die Pole des Magnetes verbindet.

Mit einer neuen Batterie und einer Lösung von Salz in Wasser bei einer Temperatur von 190° F trägt der dargestellte Elektromagnet 7 ¼ *kg*."

Nachdem Sturgeon in Manchester die Verwaltung der „Victoria Gallery of Practical Science" übernommen hatte, setzte er im Jahre 1840 seine Arbeit fort und schrieb in der siebenten Abhandlung seiner Reihe von Untersuchungen Folgendes nieder:

Der dem Institut gehörige Elektromagnet ist aus einem cylindrischen Stabe weichen Eisens gefertigt und in Form eines Hufeisens gebogen. Die beiden Schenkel laufen parallel und stehen 11,4 *cm* von einander ab. Der Durchmesser des Eisens beträgt 7 *cm*, die Länge des Eisens nach der Biegung 45,7 *cm*. Vierzehn Wickelungen aus Kupferdraht, sieben auf jedem Schenkel, umgeben das Eisen. Der zu den Wickelungen verwendete Draht hat 2,1 *mm* Stärke, jede Wickelung enthält etwa 21 *m* Draht. Die Wickelungen sind behufs Fortleitung der Ströme aus der Batterie in gewöhnlicher Weise mit Zweigdrähten verbunden. Der Magnet war von Mr. Nesbit angefertigt worden. Das vom Magnet bei den Versuchen getragene grösste Gewicht betrug 622 *kg*; die Kraft wurde durch 16 Plattenpaare (Elemente) hervorgebracht, die in 4 Gruppen von je 4 Paaren vertheilt waren. Die Anziehungskraft bei 19 Paaren in Reihe war weit geringer als bei 10 Paaren in Reihe und nur wenig geringer, als die durch eine Zelle oder ein Zellenpaar hervorgebrachte Kraft. Dieser Vorgang erscheint bemerkenswerth und zeigt, wie leicht man es dahin bringen kann, durch Anordnung von Elementen die magnetischen Kräfte der Batterien zu vergeuden [1]).

Erst drei Jahre nach Sturgeon's Erfindung wurde von derselben in Deutschland Kenntniss genommen. Im Jahre 1828 zeigte Pohl [2]) einen kleinen Elektromagnet in Berlin vor. Pfaff [3]) beschrieb 1830 einen von Watkins angefertigten Sturgeon'schen Elektromagnet, den er während eines Besuches in London gesehen hatte. Die epochemachende Veröffentlichung von Ohm über das Gesetz des elektrischen Stromkreises entstammt demselben Jahre wie die Entdeckung von Sturgeon (1825), obwohl das vollständige Werk erst 1827 veröffentlicht wurde und in englischer Uebersetzung von Dr. Francis nicht früher als

1) Sturgeon's Scientific Researches, S. 188.
2) Feilitzsch, Lehre vom Galv. Strom, S. 95.
3) Schweigger's Journal, LVIII, S. 273, 1830.

Digitized by Google

1841 erschien (in Taylor's Scientific Memoirs, Bd. II). Ohne die durch Ohm's Gesetz gebotene Führung war es nicht befremdend, das auch die fähigsten Versuchssteller die Beziehungen zwischen Batterie und Stromkreis, welche die Wirkungen zu liefern im Stande waren, nicht zu verstehen vermochten. Diese mussten durch die schwierige Methode des Probirens und des Misslingens gefunden werden. Besonders hervorragend unter den Versuchsstellern war Professor Joseph Henry, damals am Albany Institute zu New York, später zu Princeton, New Jersey; derselbe stellte nicht nur Versuche an, sondern war auch in bedeutender Verbesserung erfolgreich. Auf Grund des Studiums des Multiplikators (oder Galvanometers) schlug er 1828 vor, elektromagnetische Apparate mit Spiralwickelung von Draht zu versehen, dessen Windungen dicht zusammenliegen; der Draht sollte aus 0,6—1 *mm* starkem Kupfer bestehen und mit Seide besponnen werden. Im Jahre 1831 beschrieb er[1]) die Ergebnisse seiner Versuche wie folgt:

> Ein rundes Eisenstück von etwa 6 *mm* Stärke wurde in Form eines Hufeisens gebogen; anstatt es nun, wie gewöhnlich beschrieben ist, mit einigen Fuss Draht lose zu umgeben, wurde es dicht mit 10—11 *m* Draht umwickelt, der mit Seide besponnen war, sodass etwa 400 Windungen entstanden; ein paar kleine galvanische Platten, die in einen Becher mit verdünnter Säure getaucht werden konnten, waren mit den Enden der Wickelung verlöthet, das Ganze wurde an einem Rahmen angeordnet.
>
> Unter Verwendung dieser kleinen Platten wurde das Hufeisen viel kräftiger magnetisch als ein anderes von gleicher Grösse und in derselben Weise bewickeltes, wenn eine Batterie aus 28 Kupfer- und Zinkplatten, jede von 181 *qcm* Flächeninhalt, benutzt wurde. Eine andere passende Form für diesen Apparat war in der Weise erdacht, dass ein gerader Eisenstab von 22,9 *cm* Länge mit 10,7 *m* Draht bewickelt und horizontal über einem kleinen kupfernen Becher, der einen Zinkcylinder enthielt, angebracht wurde; füllte man diesen Becher, der den doppelten Zweck eines Gestelles und eines galvanischen Elementes erreichen sollte, mit verdünnter Säure an, so erhielt man einen tragbaren Elektromagnet. Diese Artikel wurden im März 1829 dem Institut eingereicht. Später kam mir der Gedanke, dass mittels der zwei kleinen Platten eine genügende Menge von Galvanismus hervorgebracht war, um mittels der Spule eine weit grössere magnetische Kraft in einem grösseren Eisenstück zu entwickeln. Um dies zu prüfen, wurde ein cylindrischer Eisenstab von 12,5 *mm* Durchmesser und etwa 25 *cm* lang, in Form eines Hufeisens gebogen und mit etwa 9 *m* Draht bewickelt; mit einem

1) Silliman's Amer. Journ. of Science Jan. 1831, XIX, S. 400.

Digitized by Google

Plattenpaar von nur 16 *qcm* Oberfläche hob der Magnet 6,8 *kg*. Zu derselben Zeit regte die Durchsicht des eingehenderen Berichtes über Professor Schweigger's Galvanometer eine erhebliche Verbesserung für die Herstellung der Wickelung bei mir an, mit vollständigem Erfolge wurde dies mit demselben Hufeisen untersucht. Die Verbesserung bestand in der Anwendung einiger Drahtlitzen, von denen jede mit Seide bedeckt war, anstatt nur einer Litze. Nach dieser Bauart wurde ein zweiter Draht von derselben Länge wie der erste über diesen gewickelt, und die Enden so mit dem Kupfer und Zink verlöthet, dass der galvanische Strom in derselben Richtung in beiden Drähten floss oder mit andern Worten, dass die beiden Drähte wie einer wirken mussten. Das Ergebniss dieser Zusammenlegung brachte eine Verdoppelung der Wirkung hervor, indem das Hufeisen mit denselben Platten wie früher, jetzt 12,7 *kg* trug.

Mit einem Paar Platten in den Abmessungen 10 : 15 *cm* konnte man 17,7 *kg*, oder mehr als das 50fache Eigengewicht des Elektromagnetes anheben.

Diese Versuche erwiesen, dass eine bedeutende Entwickluug von Magnetismus durch ein sehr kleines galvanisches Element bewirkt werden konnte, ebenso auch, dass die Kraft der Wickelung wesentlich zunahm, wenn die Anzahl der Drähte vermehrt wurde, ohne dass die Länge eines jeden sich vergrösserte[1]).

Professor Henry war mit dem Erreichten indessen noch nicht zufrieden, sondern strebte in derselben Richtung weiter voran, die er eingeschlagen hatte. Er war eifrig bemüht, festzustellen, eine wie grosse magnetische Kraft er hervorbringen könne, falls er nur Ströme von so geringer Stärke benutzen würde, als solche durch die verhältnissmässig dünnen Kupferdrähte fliessen könnten, wie sie etwa für Weckerleitungen benutzt werden.

Im Laufe des Jahres 1830 machte er in dieser Beziehung grosse Fortschritte, wie aus nachfolgendem Auszuge hervorgeht:

„Um zu bestimmen, in welcher Länge die Wickelung zur Erregung des Magnetismus in weichem Eisen anzuwenden war und um auch nach Möglichkeit die zweckmässigste Länge des zu verwendenden Drahtes festzustellen, wurde gemeinschaftlich von Dr. Philip Ten-Eyck und mir eine Reihe von Versuchen angestellt. Zu diesem Zwecke wurden 323 *m* Kupferdraht (von der „Glockendraht" genannten Sorte), 1,1 *mm* stark, verschiedene Male quer durch das grosse Zimmer der Akademie gespannt.

Versuch 1. Von einem einzelnen Plattenpaar Kupfer und Zink (12,9 *qcm*) wurde ein Strom durch die ganze Länge des Drahtes gesandt und die auf ein Galvanometer ausgeübte Wirkung beobachtet. Das Mittel der Nadelablenkung aus verschiedenen Versuchen betrug 15°.

1) Scient. Writings of Jos. Henry, S. 39.

Digitized by Google

Versuch 2. Von denselben Platten wurde ein Strom durch die Hälfte des Drahtes gesandt, die Ablenkung betrug 21°.

Man sieht aus einer trigonometrischen Tafel, dass die Tangenten von 15° und 21° nahezu im Verhältniss der Quadratwurzeln von 1 und 2, oder der bezüglichen Länge der Drähte bei diesen Versuchen stehen. Die Länge des Galvanometerdrahtes kann vernachlässigt werden, da dieselbe nur 2,4 *m* betrug.

Versuch 3. Das Galvanometer wurde nun ausgeschaltet und die ganze Länge des Drahtes mit den Enden der Wickelung eines kleinen Hufeisens (aus weichem Eisen von 6 *mm* Durchmesser) verbunden. Der Wickelungsdraht hatte eine Länge von 2,4 *m*. Der Strom wurde aus den bei den Versuchen 1 und 2 benutzten Platten entnommen. In dem Hufeisen war kaum Magnetismus zu beobachten.

Versuch 4. Die kleinen Platten wurden ausgeschaltet; eine Batterie aus einer Zinkplatte in den Abmessungen 10 : 18 *cm*, umgeben mit Kupfer, wurde eingeschaltet. Als diese Batterie unmittelbar mit den Enden der Wickelung von 2,4 *m* Länge verbunden wurde, betrug das angehobene Gewicht 2 *kg*; floss dagegen der Strom durch die ganze Länge des Drahtes (323 *m*), so wurden nur etwa 28 *g* gehoben.

Versuch 5. Der Strom aus derselben Batterie wurde durch die halbe Länge des ganzen Drahtes geleitet, es wurden 56 *g* gehoben.

Versuch 6. Es wurden zwei Drähte von derselben Länge wie bei dem vorigen Versuch benutzt, um zwei Leiter von dem Zink und Kupfer der Batterie aus zu bilden, das angehobene Gewicht betrug 112 *g*.

Versuch 7. Der Draht in ganzer Länge wurde mit einer kleinen Trogbatterie, welche 25 Doppelplatten enthielt, verbunden. Diese Batterie bot genau die gleichgrosse Zinkoberfläche der Säurewirkung dar, als die bei dem vorigen Versuch verwendete Batterie. Das gehobene Gewicht betrug 224 *g*, wurde der Zuleitungdraht entfernt und die Trogbatterie unmittelbar mit den Enden der Wickelung des Hufeisens verbunden, so wurden nur 196 *g* angehoben.

Es ist möglich, dass der veränderliche Zustand der Trogbatterie rücksichtlich der Austrocknung etwas Einfluss auf das bemerkenswerthe Ergebniss ausgeübt haben kann; indessen ist sicher, dass die Wirkung eines einer Trogbatterie entstammenden Stromes, wenn nicht vergrössert, doch infolge Durchleitens durch einen langen Draht unbedeutend vermindert wird.

Wie dem auch sein möge, so ist die Thatsache, dass die magnetische Wirkung eines Stromes aus einer Trogbatterie mindestens nicht merklich durch einen langen Leiter verringert wird, unmittelbar auf den Plan des Mr. Barlow zur Herstellung eines elektromagnetischen Telegraphen anwendbar; ebenso lässt sich eine wesentliche Folgerung für die Bauart einer galvanischen Wickelung ziehen. Aus den Versuchen leuchtet ein, dass man, um eine Wickelung herzustellen, entweder einen sehr langen Draht oder mehrere kürzere anzuwenden hat, je nachdem die Umstände liegen; im ersteren Falle müssen die galvanischen Combinationen eine Anzahl von Platten um-

Digitized by Google

fassen, um die treibende Kraft zu schaffen, im zweiten Falle wird ein einzelnes Paar gebildet.

Um in weitem Umfange die Richtigkeit dieser vorläufigen Ergebnisse zu prüfen, wurde ein Stab aus weichem Eisen von 12,9 *qcm* Querschnittsfläche und 50 *cm* Länge in Form eines Hufeisens von 24 *cm* Höhe gebogen; die scharfen Ränder des Stabes wurden zuerst ein wenig mit dem Hammer abgerundet. Das Gewicht betrug 9,5 *kg*; ein Stück Eisen von demselben Stabe im Gewicht von 3,2 *kg* wurde auf einer Seite ganz glatt gefeilt, um den Anker zu bilden, die Schenkelenden des Hufeisens wurden der Oberfläche des Ankers angepasst. Das Hufeisen wurde mit 162 *m* Kupferdraht in 9 Wickelungen von je 18 *m* Länge umgeben; diese Wickelungen setzten sich nicht auf die ganze Länge des Stabes fort, sondern jedes Drahtstück nahm in Gemässheit des vorhin erwähnten Grundsatzes nur etwa 50 *mm* Länge des Stabes in Anspruch und zwar in mehreren Lagen übereinander aufgespult, die verschiedenen Enden der Drähte standen vor und waren numerirt, sodass man Anfang und Ende jeder Wickelung gleich unterscheiden konnte. In dieser Weise stellten wir einen, in weitem Umfange gebrauchsfähigen Versuchsmagnet her, an dem verschiedene Schaltungen der Wickelungen durch entsprechende Verbindung der vorstehenden Enden ausführbar waren. War so das zweite Ende des ersten Drahtes mit dem ersten Ende des zweiten Drahtes verbunden und in dieser Art durch sämmtliche Wickelungen hindurch, so bildete das Ganze die fortlaufende Wickelung eines Drahtes. Durch Verbindung verschiedener Enden kann man auch eine Doppelwickelung von der halben Drahtlänge oder eine dreifache Wickelung von einem Drittel der Drahtlänge herstellen u. s. w. Das Hufeisen wurde in einem starken rechtwinkeligen Holzgestell aufgehängt, letzteres war 114 *cm* hoch und 51 *cm* weit; unterhalb des Magnetes wurde ein Eisenstab befestigt, um als Hebel zu wirken; die verschiedenen Traggewichte wurden durch ein Schlittengewicht bestimmt, in derselben Weise, wie solches bei einer gewöhnlichen Schnellwage geschieht. Bei den später beschriebenen Versuchen wurde eine kleine Batterie benutzt, die aus zwei concentrischen Kupfercylindern mit zwischenliegendem Zink bestand, die gesammte Zinkfläche, die der Säurewirkung ausgesetzt war, betrug 186 *qcm*; die Batterie erforderte zur Eintauchung nur 0,3 *l* verdünnte Säure.

Versuch 8. Jede Wickelung des Hufeisens wurde nacheinander mit der Batterie verbunden, der jedesmal erzeugte Magnetismus genügte, um das Gewicht des Ankers — 3,2 *kg* — zu tragen.

Versuch 9. Es wurden zwei Wickelungen, eine auf jeder Seite des Bogens des Hufeisens benutzt, die Tragkraft betrug 66 *kg*.

Versuch 10. Bei Anwendung von zwei Wickelungen, von denen je eine an dem äussersten Schenkelende lag, betrug die Tragkraft 91 *kg*.

Versuch 11. Wurde zu den beiden vorgenannten Wickelungen noch eine dritte, in der Mitte der Biegung liegende hinzugenommen, so stieg die Tragkraft auf 136 *kg*.

Digitized by Google

Versuch 12. Mit vier Wickelungen, je zwei auf einem Schenkelende, betrug die Tragkraft 227 *kg*; wurde die Säure von dem Zink entfernt, so erhielt sich die Tragkraft wenige Minuten auf einer Höhe von 59 *kg*.

Versuch 13. Bei Anwendung von 6 Wickelungen erreichte die Tragkraft 258 *kg*; bei allen diesen Versuchen waren die Drähte mit dem galvanischen Element verlöthet, in keinem Falle wurde die Verbindung mittels Quecksilber hergestellt.

Versuch 14. Als sämmtliche 9 Drähte verbunden waren, war der Höchstbetrag der Tragkraft 295 *kg*. Es sei daran erinnert, dass dieses erstaunliche

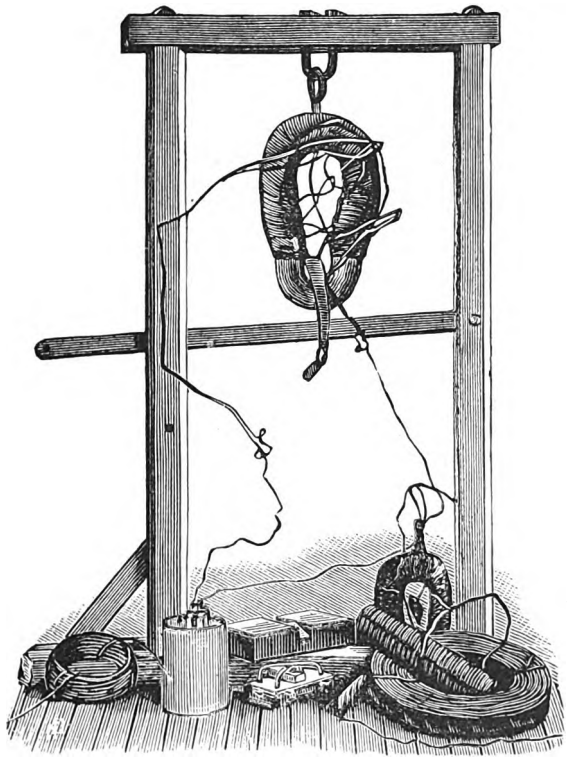


Fig. 5.

Diese Figur, die dem Scientific American, Dez. 11. 1880, entnommen ist, stellt den Elektromagnet von Henry dar, der noch in Princeton College aufbewahrt wird. Die Apparate am Fuss des Gestelles, einschl. eines Stromwenders und einer bandförmigen Spule, die bei den berühmten Versuchen über sekundäre und tertiäre Ströme verwendet wurden, sind meistens von Henry selbst hergestellt worden.

Ergebniss durch eine Batterie von nur 186 *qcm* Zinkoberfläche, die nicht mehr als 0,3 *l* verdünnter Säure zur Eintauchung erforderte, hervorgebracht worden war.

Versuch 15. An Stelle des bisher benutzten galvanischen Elementes wurde ein solches mit einer Zinkplatte von 30,5 *cm* Länge und 15 *cm* Breite, umgeben von Kupfer, verwendet, die Tragkraft war 340 *kg*.

Digitized by Google

Versuch 16. Um die Wirkung eines sehr kleinen galvanischen Elementes auf die grosse Eisenmasse zu bestimmen, wurden einige Platten von genau 6,45 *qcm* Grösse mit sämmtlichen Drähten verbunden, die Tragkraft betrug 38,5 *kg*.

Die folgenden Versuche wurden mit Drähten verschiedener Länge auf demselben Hufeisen angestellt:

Versuch 17. Mit 6 Drähten von je 9 *m* Länge, welche mit dem Element verbunden waren, trug der Magnet 170 *kg*.

Versuch 18. Dieselben Drähte wurden so verbunden, dass sie drei Wickelungen von je 18 *m* bildeten, die Tragkraft war 91 *kg*. Dieses Ergebniss kommt dem im Versuch 11 erzielten nahe, obgleich nicht dieselben Drähte benutzt wurden. Hieraus ist ersichtlich, dass sechs kurze Drähte kräftiger sind, als drei von doppelter Länge.

Versuch 19. Die im Versuch 10 verwendeten Drähte, welche jedoch zu einer Spule von 36 *m* Drahtlänge vereinigt waren, erzielten eine Tragkraft von 27 *kg*, während der Versuch 10 eine Tragkraft von 91 *kg* ergab. Hierdurch wird das Ergebniss des vorigen Versuches bestätigt. Bei den Versuchen wurde eine etwas überraschende Thatsache beobachtet; wurde nämlich die grosse Batterie benutzt und der Anker berührte beide Magnetpole, so konnte er mehr als 317 *kg* tragen, lag er aber nur an einem Pole an, so trug er nicht mehr als 2,3—2,7 *kg*, in diesem Falle konnte der Magnet nicht einmal den Anker (3,2 *kg*) festhalten. Dieser Umstand mag vielleicht bei allen grossen Magneten eintreten, wir haben jedoch niemals bemerkt gefunden, dass ein so grosser Unterschied in der Wicklung eines einzelnen Poles und beider Pole vorkommt.

Durch Dr. Ten Eyck wurde eine besondere Reihe von Versuchen zu dem Zwecke angestellt, um die höchste Entwickelung des Magnetismus in einer kleinen Masse weichen Eisens festzustellen.

Die meisten der in dieser Abhandlung niedergelegten Ergebnisse werden von Dr. L. C. Beck bezeugt. Diesem verdanken wir auch verschiedene neue Angaben, besonders den Gebrauch gut gewachster Baumwolle an Stelle der Seide, welche letztere bei den Forschungen einen sehr erheblichen Ausgabeposten darstellte. Er stellte auch eine Anzahl von Versuchen mit eisernen Drähten an, welche möglicherweise an Stelle des Kupfers verwendet werden konnten. Mit einem kurzen derartigen Draht wurde beinahe die gleiche Wirkung als mit Kupfer erzielt, jedoch mit langen Drähten und einem kleinen galvanischen Element war der Erfolg unbefriedigend. Dr. Beck stellte auch ein Hufeisen aus rundem Querschnitt von 25 *mm* Stärke her und brachte vier Spulen, wie früher beschrieben, auf. Mit einer Wickelung hob er 14 *kg* an, mit zwei 28 *kg*, mit drei 38,5 *kg*, mit vier 51 *kg*. Während wir noch mit diesen Untersuchungen beschäftigt waren, erhielten wir die letzte Nummer von Edinburg's Journal of Science, welche die Abhandlung von Prof. Moll über Elektromagnetismus enthält. Einige seiner Ergebnisse stimmen mit den beschriebenen überein; der Gegenstand seiner Untersuchung war in-

Digitized by Google

dessen ein anderer, denn sein Ziel war, mit einer kräftigen galvanischen Batterie starken Magnetismus in weichem Eisen hervorzurufen. Der wesentlichste Zweck bei unseren Versuchen bestand aber darin, die grösste magnetische Kraft mit der geringsten Menge Galvanismus zu erzeugen. Allein Professor Moll's Abhandlung führte die beschleunigte Veröffentlichung dieser Versuche herbei; die Grundlage, auf der letztere gebaut waren, war uns seit fast zwei Jahren bekannt und zu jener Zeit dem Albany Institut vorgelegt [1]).

In der nächsten Nummer von Silliman's Journal (April 1831) berichtete Prof. Henry über einen grossen Elektromagnet, der für das Laboratorium des Yale College hergestellt worden war. Der Kern dieses Magnetes wog 27 *kg*, er war unter der Leitung von Henry geschmiedet und durch Dr. Ten Eyck bewickelt worden. Die Wickelung bestand aus 26 Litzen Kupferdraht mit einer Gesammtlänge von 221 *m*. Die Erregung erfolgte mittels zweier Zellen mit etwa 0,44 *qm* wirksamer Oberfläche. An seinem Anker, der 10 *kg* wog, trug er eine Belastung von 936 *kg*.

Im Jahre 1857 schrieb Henry über seine früheren Versuche und im Betreff seiner Ansichten über die Benutzung von Zusatzwickelungen bei einem Magnet und die Verstärkung der Batteriekraft Folgendes [2])

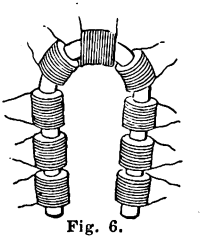


Fig. 6.

Zur Prüfung dieser Grundsätze in weiterem Umfange wurde der Versuchsmagnet in der Weise angeordnet, wie ihn die Figur 6 zeigt. Bei diesem war ein Anzahl Spulen auf denselben Stab gebracht, die Enden ragten vor und waren so bezeichnet, dass sie sämmtlichen eine lange Wickelung vereinigt oder in verschiedener Weise in Sätzen von geringerer Länge verbunden werden konnten.

Durch eine Reihe von Versuchen mit diesem und andern Magneten wurde der Beweis geliefert, dass, um den Höchstbetrag des Magnetismus durch ein einzelnes Batterieelement hervorzubringen, eine Anzahl Wickelungen erforderlich ist; wird indessen eine zusammengesetzte Batterie benutzt, so ist ein langer Draht zu verwenden, welcher in vielen Windungen um das Eisen läuft, die Länge des Drahtes und demzufolge die Anzahl der Windungen müssen der treibenden Kraft der Batterie entsprechen.

Bei der Beschreibung der Ergebnisse meiner Versuche wurden die Ausdrücke „Intensitäts"- und „Quantitäts"-Magneten zur Vermeidung

1) Scient. Writings of Jos. Henry I, S.49.

2) Statement in Relation to the History of the Elektromagnetic Telegraph (aus dem Smithsonian Annual Report für 1857, S. 99) und Scient. Writings, II, S. 435.

Digitized by Google

von Umschreibungen eingeführt; es sollten diese Ausdrücke lediglich eine technische Bedeutung haben.

Mit dem Worte „Intensitätsmagnet" bezeichnete ich ein Stück weichen Eisens, das derart von Draht umgeben ist, dass eine auf „Intensität"[1]) geschaltete Batterie die magnetische Kraft in Wirksamkeit setzen konnte; mit „Quantitätsmagnet" bezeichnete ich ein von einer Anzahl getrennter Wickelungen derart umgebenes Eisenstück, dass durch eine auf „Quantität" geschaltete Batterie der Magnetismus voll entwickelt werden konnte.

Ich war der Erste, welcher in meiner Abhandlung in Silliman's Journal im Januar 1831 den Zusammenhang dieser beiden Batteriearten mit den beiden Magnetformen darlegte und klar feststellte, dass, wenn der Magnetismus mit Hülfe einer zusammengesetzten Batterie entwickelt werden sollte, man eine lange Spule verwenden müsse und dass, wenn der Höchstbetrag der Wirkung durch ein Element hervorzubringen sei, eine Anzahl einzelner Litzen erforderlich sei ..... Weder der Elektromagnet von Sturgeon noch irgend ein anderer vor meinen Forschungen hergestellter Elektromagnet war zur Uebertragung von Kraft in die Ferne geeignet ..... Der von Sturgeon hergestellte und von Dana in New York nachgebildete Elektromagnet war ein unvollkommener „Quantitätsmagnet"[2]), die schwache Kraft desselben wurde durch ein einzelnes Element entwickelt.

Henry fasst endlich seine Stellung zur Sache folgendermassen zusammen:

1. Vor der Zeit meiner Untersuchungem wurden die Mittel zur Entwickelung des Magnetismus in weichem Eisen nur unvollkommen verstanden, und der damals vorhandene Elektromagnet war zur Uebertragung von Kraft in die Ferne nicht geeignet.
2. Ich habe zuerst durch einen Versuch erwiesen, dass man zur Entwickelung magnetischer Kraft in der Ferne eine auf Spannung geschaltete galvanische Batterie anwenden muss, um den Strom durch den langen Leiter zu treiben, sowie dass ein von vielen Windungen eines langen Drahtes umgebener Magnet zur Aufnahme dieses Stromes zu benutzen ist.
3. Ich war der Erste, der ein Eisenstück thatsächlich aus der Entfernung magnetisirte und die Aufmerksamkeit auf die Thatsache der Anwendbarkeit meiner Versuche für den Telegraphen lenkte.
4. Ich war der Erste, welcher mit Hülfe des Elektromagnetes eine entfernte Glocke in Thätigkeit setzte.
5. Die von mir entwickelten Grundsätze wurden von Dr. Gale angewendet, um den Morseapparat in der Entfernung betriebsfähig zu gestalten.

---

1) Intensität soll hier dasselbe bedeuten, wie „Spannung", „Quantität" dagegen Stromstärke. Anm. d. Ueb.

2) Diese Kritik wird durch die Thatsachen schwerlich gerechtfertigt, da eine Batterie von geringem Widerstand für eine Wickelung von geringem Widerstand angemessen ist.

Digitized by Google

Obgleich die Untersuchungen Henry's im Jahre 1831 veröffentlicht wurden, blieben solche einige Jahre lang in Europa fast unbekannt. Wheatstone, den Henry im April 1837 in seinem Laboratorium in King's College besuchte, kannte bis dahin nicht die Bauart eines Elektromagnetes, welcher in einem langen Drahtkreise wirksam sein konnte. Cooke, welcher der Gehülfe Wheatstone's wurde, war ursprünglich im Februar 1837 zu letzterem gekommen, um sich in Betreff seines Telegraphen und Weckers Raths zu erholen[1]). Die Elektromagnete derselben versagten nämlich in einem Stromkreise, der nur eine Meile Draht enthielt, obgleich sie in kurzen Stromkreisen gut arbeiteten.

Wheatstone's eigener Bericht[2]) über die Angelegenheit ist sehr bestimmt: Im Vertrauen auf meine frühere Erfahrung, sagte ich einst zu Mr. Cooke, dass sein Entwurf als Telegraph weder arbeiten würde noch könne, weil dem in einem langen Stromkreise eingeschalteten Elektromagnet eine hinreichende Anziehungskraft nicht mitzutheilen sei; um ihn von der Richtigkeit dieser Versicherung zu überzeugen, lud ich ihn zum Besuche in King's College ein, woselbst er eine Wiederholung derjenigen Versuche sehen könne, auf welche ich meine Schlussfolgerung gründete. Er kam auch, und nachdem er verschiedene voltaische Magnete gesehen hatte, welche sogar mit Hülfe kräftiger Batterien nur eine geringe anziehende Kraft bewiesen, drückte er seine getäuschte Erwartung aus.

Nach Henry's Besuch bei Wheatstone änderte der letztere seine Sprache. Er hatte in Ermangelung eines Besseren Relaiskreise benutzt, um die Elektromagnete seines Weckers in einem kurzen Kreise mittels einer Ortsbatterie zu betreiben. Diese kurzen Kreise, schreibt er, haben fast alle Bedeutung verloren und sind kaum werth, dass man seit meiner Entdeckung darüber streitet, ob Elektromagnete derart hergestellt werden können, um sogar in sehr langen Kreisen durch unmittelbare Stromwirkung die verlangte Thätigkeit zu entwickeln[3]).

Wir gehen nunmehr zu den Untersuchungen des ausgezeichneten Physikers in Manchester, Mr. James Prescott Joule

1) Vgl. Mr. Latimer Clarks account of Cooke in Band VIII, S. 374 des Journ. of Society of Telegr. Engin.

2) W. F. Cooke, The electric Telegraph: Was it invented by Professor Wheatstone? 1856—57. II, S. 87.

3) W. F. Cooke, the electric. Telegraph, S. 95.

Digitized by Google

über, dessen Tod wir unlängst zu beklagen hatten. Wie früher erwähnt worden ist, war Sturgeon im Jahre 1838 nach Manchester gekommen, wo seine Vorlesungen über Elektromagnetismus die Aufmerksamkeit vieler jüngeren Männer erregten. Unter diesen befand sich Joule, welcher durch Sturgeon's Arbeit angefeuert, sehr werthvolle Beiträge auf dem genannten Gebiete lieferte. Die meisten derselben wurden entweder in Sturgeon's Annals of Electricity oder in den Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester veröffentlicht. Am besten zugänglich sind die Abhandlungen durch die vor fünf Jahren von der Physical Society of London veranstaltete Ausgabe.

Seine frühesten Forschungen bestanden in dem Bemühen die Einzelheiten einer elektrischen Triebmaschine auszuarbeiten Das Nachstehende ist ein Auszug aus seinem eigenen Bericht Reprint of Scientific Papers, S. 7):

> Bei der früheren Verfolgung meiner Forschungen nahm ich sechs runde Eisenstäbe verschiedenen Durchmessers und verschiedener Länge, auch einen hohlen Cylinder mit 2 *mm* starker Wand. Dieselben waren in U-Form gebogen, die kürzeste Entfernung zwischen den Enden betrug 12,5 *mm*, die Wickelung bestand aus 0,6 *mm* starkem Kupferdraht von 3 *m* Länge. Die Anziehungskraft bei gleichen Strömen auf einen geraden Stahlmagnet von 38 *mm* Länge, der horizontal am Balken einer Wage aufgehängt war, hatte in der Entfernung von 12,5 *mm* die folgenden Werthe:

		No. 1 hohl	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
			solide					
Länge des gebog. Stabes	*cm*	15,2	14,0	6,9	13,5	6,3	13,5	5,8
Durchmesser	*mm*	12,7	12,7	12,7	9,5	9,5	6,3	6,3
Anziehung auf den Stahlmagnet in *g*		0,45	0,37	0,30	0,29	0,24	0,28	0,21
Tragkraft in *kg*		1,00	1,46	2,58	1,00	1,46	0,56	0,78

Ein Stahlmagnet, welcher eine Anziehungskraft von 1,35 *g* zeigte, besass eine Tragkraft von nur 1,7 *kg*.

Die vorstehenden Ergebnisse erscheinen nicht überraschend, wenn man bedenkt, dass:

1. der Widerstand, den das Eisen der magnetischen Induction entgegenstellt, einwirkt;
2. die Induction sehr wesentlich durch Vervollständigung des magnetischen Kreises erhöht wird.

Digitized by Google

Nichts kann mehr auffallen, als der Unterschied in dem Verhältniss der Tragkraft zur Anziehungskraft bei den verschiedenen Magneten. Während der Stahlmagnet mit einer Kraft von 1,35 *g* anzieht und 1,7 *kg* trägt, zieht der Elektromagnet No. 2 mit einer Kraft von nur 0,3 *g*, trägt aber 2,58 *kg*. Zur Herstellung eines guten Elektromagnetes, bei dem es auf Tragkraft ankommt, ist erforderlich:

1. Falls das Eisen eine beträchtliche Masse bildet, muss diese gut verarbeitet, von guter Beschaffenheit sein und gut ausgeglüht werden;
2. Die Masse des Eisens sollte in einem viel grösseren Verhältniss zu ihrer Länge stehen, als solches in der Regel zutrifft;
3. Die Pole sollten ganz genau bearbeitet, flach und sorgfältig dem Anker angepasst werden;
4. Der Anker soll in seiner Stärke dieselbe Abmessung besitzen, wie das Eisen des Magnetes.

„Bei der Prüfung, welche Elektromagnetform am besten der Bedingung der Anziehung aus der Ferne entspricht, sind zwei Umstände zu berücksichtigen, nämlich die Länge des Eisens und dessen Querschnitt.

Ich habe nun stets gefunden, dass es unvortheilhaft ist, wenn die Länge des Eisens über dasjenige Mass hinaus gesteigert wird, welches die Wickelung erfordert.“

Vorstehende Ergebnisse wurden im März 1839 veröffentlicht. Im Mai desselben Jahres legte er ein Gesetz der gegenseitigen Anziehung zweier Elektromagnete vor, das folgendermassen lautet:

Die Anziehungskraft eines Elektromagnetes auf einen zweiten ist gerade proportional dem Quadrate der elektrischen Kraft, die auf das Eisen wirkt; oder, wenn E den elektrischen Strom bedeutet, W die Drahtlänge und M die magnetische Anziehung, so ist $M = E^2 W^2$. Die Widersprüche, die er selbst beobachtete, schrieb er richtigerweise der eingetretenen magnetischen Sättigung des Eisens zu. Im März 1840 erweiterte er dasselbe Gesetz auf die Tragkraft eines hufeisenförmigen Elektromagnetes.

Im August 1840 schrieb er in den Annals of Electricity über elektromagnetische Kräfte und behandelte insbesondere einige besondere Elektromagnete in Bezug auf Anziehung. Einer derselben besass die in der Figur 7 dargestellte Form.

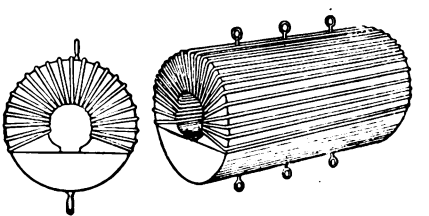


Fig. 7.

Sowohl der Magnet als der Anker waren mit Oesen zum Zweck der Aufhängung und Messung der zum Abreissen des

Digitized by Google

Ankers erforderlichen Kraft versehen. Joule schreibt über seine Versuche:[1])

„Ich gehe zur Beschreibung meiner Elektromagnete über, die ich in sehr verschiedenen Grössen herstellte, um irgend einen besondern Umstand, der eintreten konnte, zu finden. Ein Stück cylindrischen Schmiedeeisens, 20 *cm* lang, besass eine Bohrung von 25 *mm* Durchmesser in seiner ganzen Länge; die eine Seite wurde abgeschnitten und zwar soweit nach der Bohrung zu, dass die gebildeten Pole etwa 8– 9 *mm* Abstand besassen. Ein zweites Stück Eisen, ebenfalls 20 *cm* lang, wurde abgeflacht und mit seiner Fläche auf die Fläche des Cylinders gepasst, aus dem Ganzen wurde dann ein Cylinder von 20 *cm* Länge, 9,5 *cm* äusserem und 2,5 *cm* innerem Durchmesser. Das grössere Stück wurde mit Calico bedeckt und mit 4 mittels Seide isolirten Kupferdrähten bewickelt. Jeder Draht war 7 *m* lang und 2,3 *mm* stark; der Draht reichte gerade aus, um die äussere Oberfläche zu bedecken und die innere Höhlung auszufüllen . . . . Der beschriebene Magnet ist mit No. 1 bezeichnet, die übrigen sind in der Reihenfolge ihrer Beschreibung mit Zahlen versehen.

No. 2 verfertigte ich aus einem runden Eisenstabe von 12,5 *mm* Stärke und 68,6 *mm* Länge; er wurde fast halbkreisförmig gebogen und darauf mit 2 *m* isolirten Kupferdrahtes von 1,2 *mm* Stärke bewickelt. Die Pole stehen 12,7 *mm* von einander und der Draht füllt den Raum zwischen ihnen vollkommen aus.

Ein dritter Elektromagnet wurde aus einem 17,8 *mm* langen, 9,4 *mm* breiten und 3,8 *mm* starken Eisenstück hergestellt. Seine Kanten wurden so abgenommen, dass ein elliptischer Querschnitt entstand. Das Eisen wurde halbkreisförmig gebogen und mit 48 *cm* seidenumsponnenen Kupferdrahtes von 0,63 *mm* Stärke bewickelt.

Um noch eine bedeutendere Abänderung zu schaffen, stellte ich einen Elektromagnet her, den man mit Rücksicht auf seine sehr geringe Grösse wohl als Elementar-Elektromagnet bezeichnen könnte. Es ist nach meiner Ansicht der kleinste, der jemals angefertigt wurde, denn er besteht aus einem Eisenstückchen von 6,3 *mm* Länge und etwa 1 *mm* Durchmesser. Er wurde halbkreisförmig gebogen und mit 3 Windungen nicht isolirten Kupferdrahtes von 0,63 *mm* Stärke belegt.

Mit diesen Elektromagneten wurden unter Einwirkung verschiedener Stromstärken die Tragkräfte mittels Hebelvorrichtungen gemessen. Die Ergebnisse sind kurz folgende:

Der 6,8 *kg* wiegende Elektromagnet No. 1 erforderte ein Gewicht von 948 *kg*, um den Anker abzureissen. No. 2, welcher 61 *g* wog, erforderte zu dem gleichen Zwecke 22 *kg*. No. 3 wog 3,78 *g* und trug 5,4 *kg*. No. 4 wog nur 0,029 *g* und trug einen Augenblick 82 *g* oder sein 2834 faches Eigengewicht.

---

1) Scientific papers, Bd. I, S. 30.

Digitized by Google

Es erforderte viel Geduld, mit einem so kleinen Apparat, wie dem letztgenannten, zu arbeiten, es ist auch wahrscheinlich, dass ich schliesslich einen grösseren Werth als den letzten hätte erhalten können; die letzte Form zeigt indessen im Verhältniss zu ihrem Gewicht eine weit grössere Kraft als irgend eine der verzeichneten; und zwar die elffache der des berühmten Sir Isaac Newton gehörenden Stahlmagnetes.

Es ist bekannt, dass ein Stahlmagnet eine viel grössere Länge als Breite oder Stärke haben soll; Mr. Scoresby fand, dass, falls man aus einer grossen Zahl gerader Stabmagnete ein Bündel herstellt, die Kraft eines einzelnen getrennten Magnetes bei der Prüfung sich wesentlich geringer zeigt. Diese Thatsachen sind leicht einzusehen, sie finden ihre Ursache in dem Bestreben eines jeden Theiles des Systemes, in einem andern Theile entgegengesetzten Magnetismus zu induciren.

Es ist aber doch kein Grund vorhanden, in allen Fällen vom Stahlmagnet auf den Elektromagnet zu schliessen, weil bei dem letzteren eine grosse und überwiegende inductive Kraft auftritt, um dasjenige aufrecht zu halten, was bei dem erstern durch seine eigene, nicht unterstützte zurückhaltende Eigenschaft erhalten werden soll. Sämmtliche genannten Versuche unterstützen diese Ansicht; die folgende Tafel liefert den Beweis von der deutlichen und unbedingt allgemeinen Schlussfolgerung:

Die grösste Kraft eines Elektromagnetes ist gerade proportional seinem geringsten Querschnitt.

Die zweite Spalte der Tafel gibt den geringsten Querschnitt des gesammten magnetischen Kreises in Quadratmillimetern. Der Höchstbetrag der Kraft in Kilogrammen ist in der dritten Spalte verzeichnet; die vierte Spalte gibt unter der Bezeichnung „Specifische Kraft" die auf ein Quadratmillimeter entfallende Kraft an. (Siehe Tabelle S. 22.)

Auf diese Versuche folgten einige zur Bestimmung der Wirkung der Eisenlänge des Magnetes, welche mindestens nach seiner Ansicht in solchen Fällen, in denen sich der Grad der Magnetisirung beträchtlich unterhalb des Sättigungspunktes befindet, einen direkt proportionalen Widerstand der Magnetisirung entgegensetzen; die Richtigkeit dieser Ansicht ist nunmehr nach 50 Jahren vollkommen bestätigt worden.

Im November desselben Jahres wurden weitere, in gleicher Richtung angestellte Versuche[1]) veröffentlicht. Ein Eisenrohr,

1) Scientific papers, S. 40 und Annals of Electricity, Bd. V, S. 170.

Digitized by Google

Beschreibung	Geringster Querschnitt *qmm.*	Grösste Kraft *kg.*	Spezif. Kraft.
Meine eigenen Elektromagnete 1	6451	948	0,147
2	126	22	0,175
3	28	5,4	0,200
4	0,8	0,09	0,110
Elektromagnet von Nesbit. Länge über den Bogen gemessen 0,9 *m*; Durchmesser des Eisenkernes 695,5 *mm*, Querschnittsfläche 2677 *qmm*, desgl. des Ankers 2903; Gewicht des Eisens etwa 22,7 *kg*.	2903	648	0,222
Elektromagnet von Henry. Länge über den Bogen gemessen 508 *mm*; Querschnitt 1290 *qmm*; scharfe Ecken abgerundet; Gewicht 9,5 *kg*.	2541	340	0,134
Elektromagnet von Sturgeon. Länge über den Bogen gemessen etwa 0,3 *m*; Durchmesser des runden Stabes 12,7 *mm*.	126	22,7	0,18

Die vorstehenden Beispiele sind nach meiner Ansicht zum Beweise des von mir aufgestellten Gesetzes hinreichend. Der Magnet No. 1 war jedenfalls nicht vollständig gesättigt, ich zweifle sonst nicht, dass seine Kraft für das Millimeter Fläche 0,211 erreicht haben würde. Auch die spezifische Kraft von No. 4 ist gering, es liegt dies in der Schwierigkeit, einen guten Versuch mit dem Magnet anzustellen.

aus spiraligem Eisen hergestellt und geschweisst, wurde wie in dem früher beschriebenen Fall zubereitet, abgeflacht und für einen ähnlich hergestellten Anker abgepasst.

Der in Figur 8 dargestellte Cylinder besass eine Länge von 0,6 *m*, der äussere Durchmesser betrug 36 *mm*, der innere 12,7 *mm*. Die kleinste Querschnittsfläche hatte 6612 *qmm*. Die erregende Wickelung bestand aus einem einzelnen Kupferstab, der mit Band bewickelt und S-förmig gebogen war. Diese Wickelung wurde später durch 21 Kupferdrähte von je 1 *mm* Stärke und 9,8 *m* Länge ersetzt, welche mit Baumwollenband zusammen gebunden waren. Wurde dieser Magnet mit einer Batterie von 16 gusseisernen Sturgeon-Zellen, von denen jede 0,09 *qm* Oberfläche und 38 *mm* innere Weite besass, erregt, so ergab sich bei der Reihenschaltung zu 4 Zellen eine Tragkraft von 1258,7 *kg*.

Digitized by Google

Die Arbeit von Joule war des Meisters würdig, von dem er den ersten Unterricht im Elektromagnetismus erhalten hatte. Er bewies seine Verehrung nicht nur durch die Lieferung der Beschreibung in Sturgeon's Annalen, sondern auch durch die Uebergabe von zwei seiner Elektromagnete an die Victoria Gallery of Practical Science, deren Direktor Sturgeon war. Andere, welche durch Joule's Beispiel angeregt wurden, schlugen neue Magnetformen vor. Unter ihnen befanden sich zwei Herren aus Manchester, Radford und Richard Roberts, von denen der letztere ein wohlbekannter Ingenieur und Erfinder war. Radford's Elektromagnet bestand aus einer flachen Eisenscheibe, die auf ihrer Oberfläche tiefe spiralförmige Nuten besass; in letztere legte man die isolirten Kupferdrähte ein. Den Anker bildete eine flache Eisenscheibe von gleicher Grösse. Die Beschreibung findet sich im Band IV von Sturgeon's Annalen. Die von Roberts angegebene

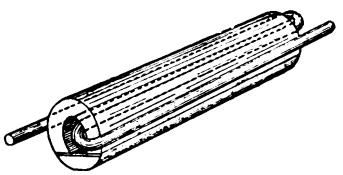


Fig. 8.

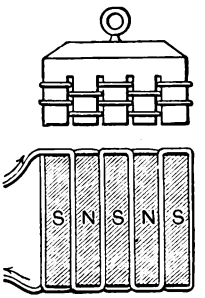


Fig. 9.

Form bestand aus einem rechtwinkeligen Eisenblock mit parallelen Quernuten, wie aus der Figur 9 zu ersehen ist. Beschrieben wird der Magnet im VI. Bande von Sturgeon's Annalen. Die Oberfläche betrug 4273 *qmm*, seine Dicke 62 *mm*. Mit der Wickelung wog der Magnet 15,9 *kg*; der Anker von gleicher Grösse und 38 *mm* Dicke wog 10,4 *kg*, Der Magnet trug nicht weniger als 1337 *kg*. Roberts folgerte, dass ein Magnet von gleicher Dicke aber von 0,46 *qm* Fläche eine Tragkraft von 101600 *kg* besitzen müsse. Einige Apparate von Roberts werden noch im Museum von Peel Park zu Manchester aufbewahrt.

Auf Seite 431 desselben Bandes der Annalen beschreibt Joule noch eine andere, in der Figur 10 dargestellte Elektromagnetform. Dieselbe war in Wirklichkeit aus 24 einzelnen flachen Eisenstäben, welche an einem kreisförmigen Messingring angelöthet waren, hergestellt. Der Anker war ähnlich gebaut, indessen nicht

Digitized by Google

mit Draht bewickelt. Das Eisen des Magnetes wog 3,1 *kg*, der Anker wog 2 *kg*. Wurde der Elektromagnet durch 16 gusseiserne Sturgeon-Zellen erregt, so besass er eine Tragkraft von 1229 *kg*.

In einer späteren, 1843 veröffentlichten Abhandlung über die Wärmewirkungen der Magnetoelektricität[1]) beschrieb Joule eine andere Art eines hufeisenförmigen Elektromagnetes, der aus einer Kesselplatte hergestellt war. Es war nicht beabsichtigt, mit demselben eine grosse Tragkraft zu erzielen, sondern er wurde als Feldmagnet einer Triebmaschine benutzt.

Im Jahre 1852 stellte Joule zu Versuchszwecken einen dem vorbeschriebenen ähnlichen andern hufeisenförmigen Elektromagnet her. Er gelangte zu dem Schlusse[2]), mit Rücksicht auf die eintretende magnetische Sättigung sei es unwahrscheinlich, dass irgend eine elektrische Stromstärke eine grössere anziehende Kraft als 0,14 *kg* für das *qmm* hervorbringen könne. Das heisst, das grösste Gewicht, das durch einen Elektromagnet, der aus einem Eisenstab von 645 *qmm* (1 Zoll engl.) Querschnitt hergestellt und halbkreisförmig gebogen ist, getragen werden kann, würde 181,4 *kg* (400 Pfund engl.) nicht übersteigen.

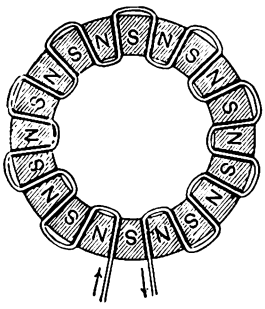


Fig. 10.

Wir können sagen, dass mit Joule's Forschungen der erste Abschnitt der Entwickelung abschliesst. Der Begriff des magnetischen Kreises, der bei Joule's Arbeiten leitend gewesen war, erschien damals den Professoren der physikalischen Theorien nicht empfehlenswerth; die Praktiker, die Telegraphen-Ingenieure, begnügten sich meistentheils, nach rein empirischen Methoden zu arbeiten. Zwischen den Praktikern und Theoretikern bestand, wenigstens über diesen Gegenstand, eine grosse Kluft. Die Theoretiker, die beweisen wollten, dass der Magnetismus in Vertheilung der Polarität auf der Oberfläche bestehe, und die Gesetze für Stahlmagnete auf Elektromagnete anzuwenden seien, stellten Gesetze auf, die für die in der Praxis vorkommenden Fälle nicht anwendbar waren und den Fortschritt eher hinderten als

1) Scientific papers, Bd. I, S. 123; und Phil. Mag. Reihe 3, Bd. XXIII, S. 263, 1843.

2) Scientific papers, Bd. I, S. 362; und Phil. Mag., Reihe 4, Bd. III, S. 32.

Digitized by Google

beförderten. Die Praktiker, welche Hülfe in der Theorie nicht fanden, verwarfen solche als irreführend und nutzlos. Allerdings machten einige wenige Forscher sorgfältige Beobachtungen und legten die Ergebnisse ihrer Untersuchungen in Gesetzen nieder. Die bedeutendsten unter ihnen waren Ritchie, Robinson, Müller, Dub, vom Kolke und Du Moncel, ihre Arbeiten waren jedoch ausserhalb der Spalten derjenigen wissenschaftlichen Zeitschriften, in denen die Versuche beschrieben wurden, wenig bekannt.

Von verschiedenen Physikern wurden Formeln über den Zusammenhang der Abmessungen eines Elektromagnetes mit der Stromstärke, der Windungszahl und dem entstehenden Betrage des erregten Magnetismus vorgeschlagen. Lenz und Jacobi geben die Regel an, dass der in einem gegebenen Elektromagnet erregte Magnetismus proportional der Stromstärke und der Windungszahl ist; eine offenbar ungenaue Regel, insofern als die Neigung zur magnetischen Sättigung der Eisenkerne unberücksichtigt bleibt. Formeln, welche die Sättigung berücksichtigen, wurden von Müller, von Waltenhofen, Lamont, Weber und Frölich angegeben. Sie sind indessen grösstentheils empirisch und geben nur einen Näherungswerth. Hierüber hat der Verfasser an anderer Stelle berichtet[1]).

Das Gesetz des Elektromagnetes konnte in der That durch irgend eine Formel, die nicht auf dem magnetischen Kreise begründet war, nicht genau ausgedrückt werden. Analogien zwischen elektrischer Strömung in einem die Elektricität leitenden Kreise und der Strömung magnetischer Kraftlinien in einem Kreise, der magnetische Leitungsfähigkeit besitzt, sind, wie schon im Vorwort bemerkt wird, vielfach in der wissenschaftlichen Literatur zu finden.

Die Arbeit von Rowland, Bosanquet und Andern bahnte den Weg für eine richtige Methode zur Behandlung der sich auf magnetische Kreise beziehenden Rechnungen. In den Jahren 1885 und 1886 erörterte Kapp die Berechnung der Feldmagnete von Dynamomaschinen aus diesem Gesichtspunkte und gab Formeln dafür an. Im Jahre 1886 legten J. und E. Hopkinson der Royal Society eine sehr vollständige und vortreffliche Untersuchung über das Problem des magnetischen Kreises vor; ihr Hauptgesichts-

1) Thompson, Die Dynamomaschine, übersetzt von Grawinkel.

Digitized by Google

punkt war von vornherein die Bestimmung der charakteristischen Curve der Magnetisirung einer Dynamomaschine aus den gewöhnlichen Gesetzen des Magnetismus und den bekannten Eigenschaften einer gegebenen Eisensorte. Sie erforschten auch durch Versuche die seitliche Zerstreuung magnetischer Linien aus einem Kreise. Seit jener Zeit sind Berechnungen über Grössen des magnetischen Kreises für Dynamomaschinen Angelegenheiten der täglichen Praxis. In den im Februar 1890 vom Verfasser herausgegebenen Cantor Lectures, welche die Grundlage dieses Werkes bilden, ist der Versuch gemacht worden, die genannte Grundlage auf die verschiedenen Erscheinungen bei Elektromagneten für alle Formen derselben auszudehnen. Die Methode zur Berechnung magnetischer Kreise wird im Kapitel IV behandelt.

Bemerkenswerthe Elektromagnete.

Eine geschichtliche Uebersicht über den Elektromagnet würde ohne eine kurze Erwähnung der durch ihre ungewöhnlichen Abmessungen bemerkenswerthen Elektromagnete nicht vollständig sein.

Faraday's Elektromagnet, der noch in der Royal Institution aufbewahrt wird, und mit dem so viele seiner und Tyndall's Untersuchungen ausgeführt wurden, ist in der Figur 11 dargestellt.

Er wird von Faraday[1]) folgendermassen beschrieben:

> Ein anderer Magnet, den ich anfertigen liess, hatte die Form eines Hufeisens. Der Eisenstab ist 117 *cm* lang und hat 95 *mm* Durchmesser. Die Biegung ist derartig ausgeführt, dass die Polenden 15 *cm* von einander entfernt sind; 159 *m* Kupferdraht von 4,3 *mm* Stärke, welcher mit Band bewickelt war, wurde in zwei Theilen um den Stab gewickelt. Er bildet zwei Wickelungen von je 40,6 *cm* Länge, die aus drei Drahtlagen zusammengesetzt sind; die Pole stehen infolgedessen 15 *cm* frei heraus, die Polenden sind genau abgeflacht, gegen diese liegen zwei kurze Stücke aus weichem Eisen an, je 17,8 *cm* lang und 63,5 : 25,4 *mm* stark, diese Stücke können mittels Schrauben angepasst und in einer Entfernung von 15 *cm* von einander gehalten werden.

Plücker's Elektromagnet[2]) wurde im Jahre 1847 hergestellt und war ebenfalls ein Hufeisenmagnet, indessen von grösserer Form. Der Kern hatte 132 *cm* Länge, 10,2 *cm* im Durchmesser und wog 84 *kg*. Die Pole standen 28,4 *cm* frei. Der Kupferdraht besass 14,93 *qmm* Querschnitt, wog 35 *kg* und war in drei Lagen

1) Experim. Researches, Bd. III, S. 29.

2) Pogg. Ann. LXXII, S. 315, 1847 und LXXIII, S. 549, 1848.

Digitized by Google

aufgewickelt. Der Elektromagnet von Feilitzsch und Holtz wurde im Jahre 1880 hergestellt[1]).

Von den vorbeschriebenen Elektromagneten unterscheidet sich derselbe durch einen geblätterten Kern. Er bildet ein Hufeisen, dessen Kern eine gesammte Länge von 285 *cm* und Stärke von 19,5 *cm* bei kreisförmigem Querschnitt besitzt. Der geringste Abstand zwischen den Polen beträgt 40,5 *cm* und die Höhe von der Aussenfläche der Biegung bis zum Mittelpunkt zwischen den

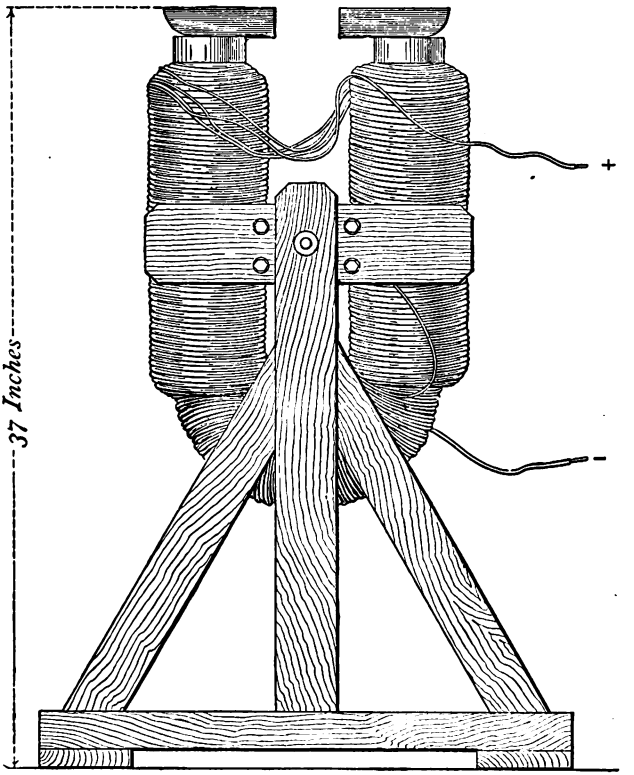


Fig. 11.

flachen Polen 125 *cm*. Der Kern ist aus 28 Streifen von 7 *mm* starkem Eisenblech verschiedener Breite aufgebaut, jeder Streifen ist besonders durch Schmieden gebogen, dann lackirt und mit den andern ohne metallischen Halt zusammengesetzt. Der ganze Kern wiegt 628 *kg*; er wurde, vorläufig zusammengehalten, mit seinen

1) Mittheil. a. d. naturw. Verein v. Neu-Pommern und Rügen, Nov. 1880, Taf. IV.

Digitized by Google

Polen aufwärts, in einer starken eichenen Büchse in Cement gelagert, sodass die Schenkel 96 *cm* freistanden. Die Wickelungen bestehen aus 15 Lagen isolirten Kupferstreifens und 10 Lagen 2 *mm* starken Drahtes, der mit Baumwolle oder Wolle umsponnen und gut gefirnisst ist. Um die erregenden Wickelungen in verschiedener Weise schalten zu können, sind entsprechende Anordnungen vorhanden.

Elektromagnet von Becquerel. Becquerel fertigte 1848 einen Elektromagnet mit aufrechten Kernen von 11 *cm* Durchmesser und 1 *m* Länge. Jede Wickelung bestand aus 910 *m* Kupferdraht von 2 *mm* Stärke und war in zwei Theilen aufgespult; das Gewicht der Wickelung betrug etwa 25 *kg*.

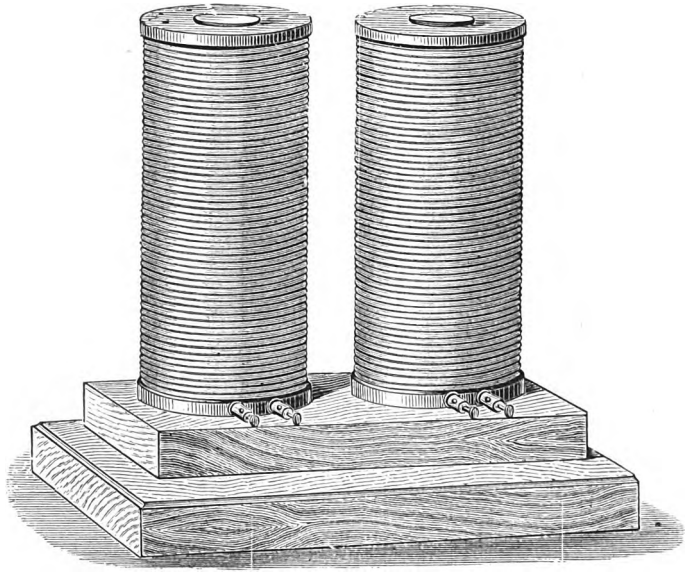


Fig. 12.

Elektromagnet von S. P. Thompson. Für den Verfasser dieses Werkes wurde 1883 ein grosser Elektromagnet von Mr. Akester in Glasgow hergestellt, den die Figur 12 zeigt.

Das eiserne Gerüst besteht aus zwei cylindrischen Kernen gut ausgeglühten Eisens von der weichsten schottischen Sorte, jeder Kern besitzt 7,3 *cm* Durchmesser und 53,5 *cm* Höhe. Die Kerne sind in einem massiven Querjoch von Schmiedeeisen eingefügt. Die Wickelungen sind auf abnehmbaren Messingspulen aufgewunden, letztere sind der Länge nach zur Verhinderung von Wirbelströmen geschlitzt; jede Wickelung wiegt etwa 34 *kg* und besteht aus un-

Digitized by Google

gefähr 1820 Windungen eines 2,67 *mm* starken Kupferdrahtes, der mit einer starken Isolationsschicht aus Kautschuk und getheertem geflochtenen Hanf bedeckt ist. Mittels dieses Elektromagnetes entdeckte der Verfasser das Ansteigen des elektrischen Widerstandes von Metallen in einem starken magnetischen Felde; dieselbe Thatsache wurde unabhängig davon und etwa zu gleicher Zeit von M. Righi veröffentlicht.

Diese Elektromagnete wurden in neuerer Zeit jedoch weit durch die Feldmagnete der Dynamomaschine übertroffen. Die in den grössten Maschinen von Edison-Hopkinson verwendeten, von Mather und Platt in Manchester erbauten Elektromagnete wiegen nicht weniger als 17272 *kg* und besitzen einen Eisenquerschnitt von 3335 *qcm*. Rechnet man (nach Joule) auf 6,45 *qcm* (1 Zoll engl.) eine magnetische Tragkraft von 91 *kg* (200 Pf. engl.), so müssten diese Elektromagnete im Stande sein, ein Gewicht von 46736 *kg* zu tragen.

Zwei eigenartige, in den Vereinigten Staaten ausgeführte Versuche verdienen Erwähnung. Im Jahre 1887 stellte Major W. R. King (von der Marine der Vereinigten Staaten) einen ungeheuren Elektromagnet aus zwei 38 *cm* (15 Zoll) Kanonen her, die nebeneinander aufgestellt und durch Auflagerung einer Anzahl eiserner Schienen am Bodenstück miteinander verbunden waren. Jede Kanone war 4,6 *m* lang und wog 25400 *kg*. Der gesammte Querschnitt der als Joch dienenden Schienen betrug 387 *qcm*; ein grösserer Querschnitt wäre vorzuziehen gewesen. Jede Kanone wurde mit drei Wickelungen umgeben, welche je 0,6 *m* Länge einnahmen und einen inneren bezw. äussern Durchmesser von 66 bezw. 102 *cm* besassen. Der verwendete Draht war ein verseiltes Kabel, dessen Kern aus 20 Kupferdrähten der Nummer 20 der Drahtlehre (0,88 *mm* Durchmesser) bestand, die mit sieben dünneren Drähten verseilt und mit Kautschuk und isolirendem Band umgeben waren, sodass der Durchmesser 10,16 *mm* betrug. Das Seil war 12874 *m* lang und hatte einen Widerstand von 19,2 Ohm. Als Anker diente ein Bündel von 15 Eisenplatten, von je 12,7 *mm* Dicke, 27,9 *cm* Breite und 2,1 *m* Länge. Der Strom wurde von einer Dynamomaschine geliefert, die für gewöhnlich 20 Bogenlampen speiste.

Die gesammte Anordnung ist in der Figur 13 dargestellt, die Figur 14 liefert eine kleine Oberansicht der Kanonen und ein

Digitized by Google

Bild von der Mündung einer der letzteren, der Lage der Wickelungen und der Wege der magnetischen Linien.

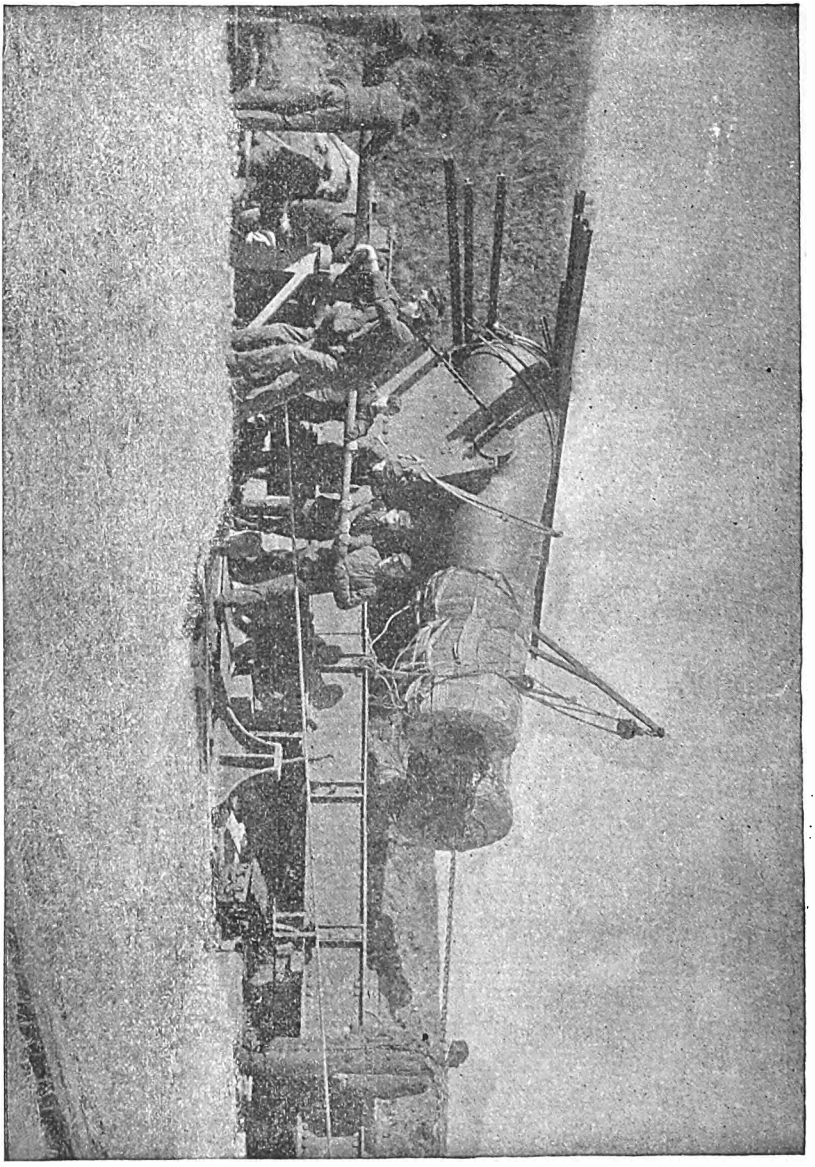


Fig. 18.

Mit diesem riesenhaften Elektromagnet wurden verschiedene Versuche angestellt [1]). Ein Gewicht von 5080 *kg*, in der Mitte

1) Vgl. Elect. World, XI, S. 27, Jan. 21, 1888.

Digitized by Google

des Ankers angebracht, konnte letzteren nicht abreissen; aus Versuchen, die unter Anwendung von Hebeln gemacht wurden, ergab sich, dass dazu fast 10160 *kg* nothwendig waren. Vier 38 *cm* (15 zöllige) Eisenbomben, jede von 145 *kg* Gewicht, wurden als magnetische Kette, eine an der andern, an der Mündung einer der Kanonen aufgehängt. Hielt man in der Hand ein Eisenstück oder eine Eisenstange, so fühlte man in einer Entfernung von

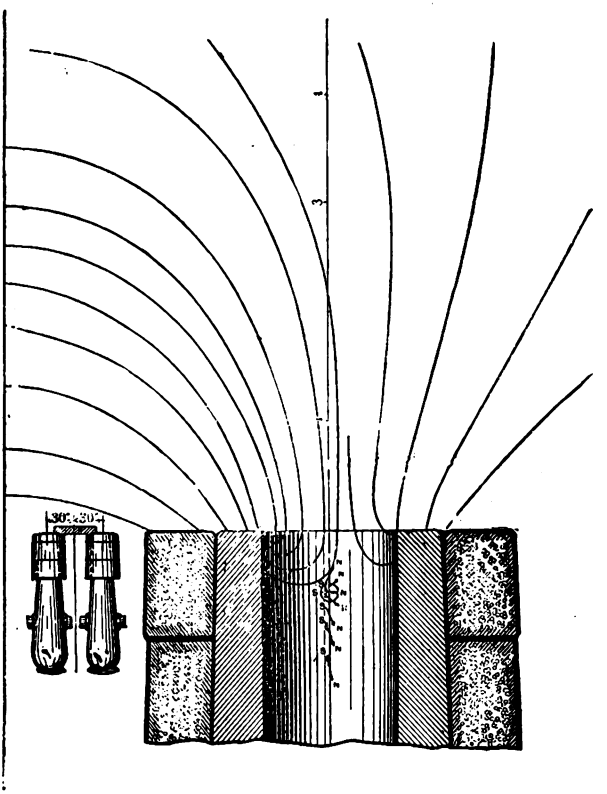


Fig. 14.

1,5—1,8 *m* von den Polen die Wirkung des magnetischen Feldes; unter Benutzung dieses Umstandes wurden die magnetischen Linien auf ein Stück Papier gezeichnet. Hielt man ein kleines Eisenstück in die Achsenrichtung der Bohrung, und zwar gerade in die Mündung der Kanonen, so wurde dasselbe kräftig nach Aussen geschleudert, wurde das Eisenstück jedoch in einen Punkt der Achse etwas weiter entfernt gebracht, so fand kräftige Anziehung statt.

Digitized by Google

Der neutrale Punkt, in dem weder Anziehung noch Abstossung herrschte, lag etwa 19 *cm* vor der Mündung. Aus dieser Thatsache erhellt ein wichtiger Grundsatz, der an einer späteren Stelle dieses Werkes erwähnt wird, dass nämlich eine kleine Eisenmasse stets von einer Stelle, wo das magnetische Feld schwach ist, nach einer Stelle sich zu bewegen strebt, wo das Feld stärker ist. Mit Rücksicht auf die durch Bohrung geschaffene Höhlung ist das magnetische Feld in der Mündung schwächer als in einem 19 *cm* nach vorne belegenen Punkt. An diesem neutralen Punkte ist das Feld nahezu gleichförmig, die magnetischen Linien laufen bis zu dieser Entfernung zusammen und gehen jenseits auseinander. Kleine eiserne Geschosse von 7,6 *cm* Länge und 2,5 *mm* Durchmesser, die auf ein glattes Brettstück in die Mündung der Kanone gelegt waren, wurden etwa 60 *cm* weit herausgeschleudert und dann plötzlich wieder nach dem äusseren Rande der Mündung hin angezogen, sodass sie wie die Stacheln eines Stachelschweines festsassen.

Im Jahre 1887 wurde ein noch grösserer Elektromagnet in der Weise hergestellt, dass man ein elektrisches Lichtkabel um den den Vereinigten Staaten gehörigen Dampfer Atlanta wand; das ganze eiserne Schiff wurde durch den Strom aus zwei Grammeschen Dynamomaschinen magnetisirt.

Der Lieutenant Bradley A. Fiske[1]), der diesen Versuch anstellte, hoffte in dieser Weise ein Hülfsmittel zu finden, um zwischen zwei Schiffen auf See Signale wechseln zu können.

1) Vgl. Electr. World, Sept. 24, 1887; auch Electrician, Bd. XIX, S. 461, 1887.

Digitized by Google

Kapitel II.

Allgemeines über Elektromagnete und Elektromagnetismus, Formen der Elektromagnete, Materialien zur Herstellung von Elektromagneten.

Verwendung im Allgemeinen.

Betrachtet man einen Elektromagnet vom mechanischen Standpunkt aus, so kann er als ein Apparat aufgefasst werden, der eine mechanische Wirkung an einer Stelle hervorbringen soll, die von der den Apparat in Thätigkeit setzenden Person entfernt liegt; das Verbindungsmittel zwischen dieser Person und dem Orte des Elektromagnetes bildet die elektrische Leitung. Die Verwendung von Elektromagneten lässt sich nach zwei Haupteintheilungen betrachten. Zu gewissen Zwecken soll ein Elektromagnet lediglich zeitweilige Adhäsion oder eine Hebekraft (anziehende Kraft) erlangen. Er haftet am Anker und trennt sich nicht, so lange der erregende Strom wirkt, es sei denn, dass eine überlegene, entgegengesetzte Kraft angewendet werde. Die Kraft, die ein Elektromagnet in dieser Weise auf einen Eisenanker ausübt, der unmittelbar mit ihm in Berührung steht, ist immer grösser, als die Kraft, die er auf einen von ihm entfernten Anker ausübt; diese beiden Fälle muss man sorgfältig unterscheiden. Die Zugkraft auf einen berührenden Anker und die Anziehungskraft auf einen entfernten Anker sind wohl zu unterscheiden; so in der That, dass es keine Uebertreibung ist, zu sagen: der zu dem einen Zweck hergestellte Elektromagnet ist für den andern ungeeignet. Die Frage, wie man Elektromagnete für je einen der beiden Zwecke herstellt, wird einen bedeutenden Theil des Folgenden in Anspruch nehmen. Die Wirkung, die ein Elektromagnet auf einen benachbarten Anker ausübt, kann verschiedenartig sein. Besteht der Anker aus weichem Eisen, und befindet er sich nahezu parallel den Polflächen, so ist die Wirkung einfach eine Anziehung, es wird eine Fortbewegung hervorgebracht, bei der es keinen Unterschied ausmacht, welcher Pol der

Digitized by Google

Nordpol oder der Südpol ist. Liegt der Anker schräg zu der die Pole verbindenden Linie, so entsteht sowohl ein Bestreben den Anker zu drehen, als ihn anzuziehen, ist der Anker wieder weiches Eisen, so wird die Wirkung unabhängig von der Polarität des Magnetes oder, was dasselbe ist, unabhängig von der Richtung des erregenden Stromes. Ist aber der Anker selbst ein Dauermagnet aus Stahl, dann hängt die Drehungsrichtung sowie die Grösse und auch das Vorzeichen der Kraft, mit der er angezogen wird, von der Polarität des Elektromagnetes, d. h. von der Richtung des erregenden Stromes. Deshalb entsteht ein Unterschied zwischen der Thätigkeit eines nicht polarisirten und eines polarisirten Apparates; die letztere Bezeichnung soll auf diejenigen Formen angewendet werden, bei denen ein Theil — z. B. ein Anker — angewendet wird, dem von Anfang an ein Magnetismus ertheilt wurde. Nicht polarisirte Apparate sind in allen Fällen unabhängig von der Richtung des Stromes. Eine andere Klasse von Verwendungsarten für Elektromagnete bildet die Erzeugung schneller Schwingungen. Dieselben werden bei elektrischen Klingelwerken, zur selbstthätigen Unterbrechung von Induktionsspulen, bei elektrisch betriebenen Stimmgabeln, wie solche chronographischen Zwecken und für die harmonische Telegraphie dienen, verwendet. Für diese besonderen Zwecke sind eigenartige Formen von Elektromagneten dienlich. Die Anpassung von Elektromagneten zu dem Zwecke, schnell wechselnden Strömen zu folgen, ist nahe verwandt damit. Endlich gibt es gewisse Anwendungen des Elektromagnetes, besonders für einige Formen der Bogenlampe, bei denen es vorzugsweise auf die Erlangung einer gleichen oder annähernd gleichen Kraft jenseits eines bestimmten Bewegungsbereiches ankommt. Diese Gebrauchsart erfordert eigenthümliche Bauart. Alles dieses wird in gebührender Reihenfolge betrachtet werden. Vor der Hand wird es erforderlich, auf einige elementare Grundlehren über Elektromagnetismus näher einzugehen.

Polarität.

Es ist eine bekannte Thatsache, dass die Polarität eines Elektromagnetes von der Richtung des den letzteren umkreisenden Stromes abhängt. Es giebt verschiedene Regeln, um die Beziehung zwischen der Strömungsrichtung und der magnetischen Kraft im Gedächtniss zu behalten. Eine sehr zweckmässige besagt, dass

Digitized by Google

gegen den Nordpol eines Elektromagnetes gesehen, der Strom diesen im entgegengesetzten Sinne der Bewegung eines Uhrzeigers umkreist. Die Verbindung der Wickelungen eines zweischenkligen Elektromagnetes ist demnach derart zu bewirken, dass der Strom kreist wie in der Figur 15 angegeben ist.

Eine andere von Maxwell angegebene zweckmässige Regel wird in der Figur 16 dargestellt.

Danach steht die Richtung des umlaufenden Stromes (entweder nach rechts oder nach links) zur positiven Richtung der resultirenden magnetischen Kraft in demselben Verhältnis zu einander, wie der Umlauf zur Bewegung einer rechtsgängigen Schraube. Rechtsgängiger Umlauf der Schraube ist mit Vorwärtsbewegung verbunden. Rechtsgängiger Stromumlauf erzeugt eine magnetische Kraft, die am andern Ende des Kernes einen Nordpol hervorzubringen sucht.

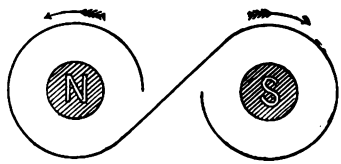


Fig. 15.

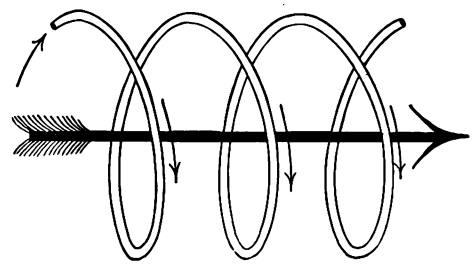


Fig. 16.

Pole und Polflächen.

Möge Magnetismus in einem Stück Magneterz oder gehärteten Stahles dauernd vorhanden sein, oder durch äusseren Umlauf elektrischen Stromes in einer umgebenden Wickelung zeitweilig in einem Stabe aus weichem Eisen hervorgebracht werden, so besteht er doch in dem Stücke Magneterz oder Stahl oder Eisen, obgleich er sich auch nach Aussen offenbaren kann. Magneterze und Stahlmagnete, sowie Elektromagnete, welche keinen geschlossenen, magnetischen Kreis bilden, zeigen bestimmte, meist bekannte Erscheinungen. Kleine Stücke Eisen oder Stahl werden angezogen und haften an gewissen Theilen der Oberfläche solcher Magnete. Compassnadeln, welche in die Nähe gebracht werden, erfahren durch den Einfluss derselben Theile eine Ablenkung. Diese Oberflächentheile eines Magneterzes oder Stahlmagnetes oder Elektromagnetes, an denen Eisenfeilspähne in Büscheln haften

Digitized by Google

bleiben, und die auf Compassnadeln einwirken, bezeichnet man gewöhnlich als Polflächen oder einfach als Pole des Magnetes. Früher wurde der Magnetismus als eine Oberflächenerscheinung betrachtet und angenommen, er sei (als unsichtbare Flüssigkeit) auf diesen polaren Theilen der Oberfläche vorhanden. Es ist indessen möglich, einen Magnet herzustellen, der, obgleich stets magnetisirt, der Pole gänzlich entbehrt. Man kann z. B. einen Stahlring derart magnetisiren (vergl. Fig. 70), dass die Magnetisirung durchaus eine innerliche bleibt; die magnetischen Linien fliessen insgesammt im Innern des Metalles und gelangen nicht an die Oberfläche. Zu diesem Zwecke umgibt man den Ring in ganzer Ausdehnung mit einer Magnetisirungsspule aus isolirtem Kupferdraht, durch den ein elektrischer Strom geleitet wird. Ein solcher Ringmagnet ist folglich unfähig, Eisenfeilspähne anzuziehen oder ein Compassnadel zu stören. Es lässt sich in zweifacher Art nachweisen, dass ein solcher Ring innerlich magnetisirt wird. Während der Magnetisirung erfährt der Ring eine Ausdehnung, welche bis 1 Minute beträgt. Wird er durchgeschnitten oder zerbrochen, so zeigt der Ring an der Schnitt- oder Bruchstelle sogleich polare Eigenschaften. Der Pol oder die polare Gegend eines Magnetes ist derjenige Theil der Oberfläche, von wo aus die innern magnetischen Linien in die Luft eintreten. Lediglich solche Theile, an denen nach früherer Auffassung die Wirksamkeit der magnetischen Flüssigkeit zu Tage treten sollte, zeigen derartige Eigenschaften. In gewisser Beziehung ist es daher richtig, dass die nach Aussen sich bemerkbar machenden polaren Erscheinungen unwesentlich sind. Nichtsdestoweniger waren es vorzüglich diese äusseren Erscheinungen, die zuerst die Aufmerksamkeit auf den Magnetismus lenkten und in erster Linie erforscht wurden.

Ihrer Betrachtung entstammten die Bezeichnungen, die bei Beschreibung der magnetischen Vorgänge angewendet wurden. Sogar die Einheit des Magnetismus, die als Hülfsmittel zur Bestimmung der verhältnissmässigen Stärken von Magneten gewählt wurde, gründet sich auf die Abstossung, welche zwei durch einen Luftzwischenraum getrennte Pole aufeinander ausüben; die Einheit der magnetischen Kraft ist wiederum auf die Einheit des polaren Magnetismus begründet. Diese jetzt allgemein angenommenen Erklärungen abändern zu wollen, ist nicht angängig. Jede Abhandlung über Magnetismus beschäftigt sich häufig mit

Digitized by Google

ihnen; für unsern Zweck genügt es deshalb, die Beziehungen darzulegen.

Magnetische Einheiten.

Die gegenwärtig von allen Elektrikern angenommenen internationalen Einheiten gründen sich auf das absolute Gewichts- und Maassystem (C. G. S System). In diesem im Anhang näher erläuterten System ist das Centimeter die Einheit der Länge, das Gramm die Einheit der Masse und die Sekunde die Einheit der Zeit. Alle andern physikalischen Einheiten werden aus den drei Grundeinheiten abgeleitet. Beispielsweise ist das Dyn oder die Einheit der Kraft diejenige Kraft, welche der Grammasse in der Sekunde die Geschwindigkeit von einem Centimeter für die Sekunde verleiht. Die Anziehungskraft der Erde auf ein Kilogramm, die man gewöhnlich als Kilogrammgewicht bezeichnet, beträgt etwa 981,354 Dyn (1 Dyn = 0,001019 Gramm) für alle Orte, wo die Beschleunigung der Schwere 981 beträgt, wo also 1 g = 981 Dyn ist.

Auf diese Krafteinheit gründet sich die magnetische Einheit.

Die Einheit des Magnetismus oder die magnetische Poleinheit besitzt derjenige Pol, der einen gleichen, im Abstand von einem Centimeter von ihm befindlichen, durch Luftzwischenraum getrennten Pol derselben Stärke mit der Kraft eines Dyn abstösst.

Die Vertheilung des Magnetismus an einer Polfläche wird gewöhnlich durch die Anzahl der magnetishen Einheiten (wie vorhin erklärt) auf das Quadratcentimeter ausgedrückt; diese Anzahl bezeichnet man zuweilen als Oberflächendichtigkeit der Magnetisirung. Auch mit den stärksten magnetischen Kräften lässt sich die Oberfächendichtigkeit nicht über einen begrenzten Betrag hinaus steigern. Ewing gibt an, dass weichstes Eisen, welches eine zeitlang der höchsten magnetisirenden Kraft ausgesetzt war, nicht mehr als 1700 magnetische Einheiten auf ein Quadratcentimeter Polfläche aufweist. Harter Stahl erlangt in der Regel keine stärkere Magnetisirung als 500 Einheiten für das Quadratcentimeter. Diese Art der Angabe für die Oberflächeneinheiten ist veraltet. Die neuere Weise geht davon aus, die im magnetischen Kreise befindlichen Kraftlinien, die von dem Metall an einer Oberfläche ausgehen und in die andere Fläche wieder eintreten, zu betrachten.

Mit Rücksicht auf diese gebräuchliche Art der Betrachtung, nach der eine magnetische Linie auf das Quadratcentimeter

Digitized by Google

zur Darstellung eines auf die Poleinheit wirkenden Dyn gezogen wird, müssen wir uns so viele Linien auf das Quadratcentmeter denken, als Dynen auf die Einheit des Poles vorhanden sind. Die Zahl der Dynen, welche auf die Poleinheit, die sich zwischen zwei dicht zusammenliegenden Oberflächen von entgegengesetzter Polarität befindet, ausgeübt werden, beträgt numerisch 4π (12,566) mal der Zahl Oberflächenheiten des Magnetismus auf das Quadratcentimeter für jede der Oberflächen. Hieraus ergibt sich die eigenthümliche Regel, dass für jede Einheit des Magnetismus an der Oberfläche man 4π magnetische Linien rechnen muss, welche durch die Fläche treten. Wenn z. B. auf irgend einer polaren Oberfläche 100 Einheiten Magnetismus sich befinden, so müssen wir uns 1257 Linien durch jene Fläche tretend denken. Bei einem Stabmagnet, fassen wir diese Linien als durch das Metall fliessend auf, an einem Ende (dem Nordpol) hervortretend, in Curven um das Metall laufend und zum andern Ende (dem Südpol) zurückkehrend.

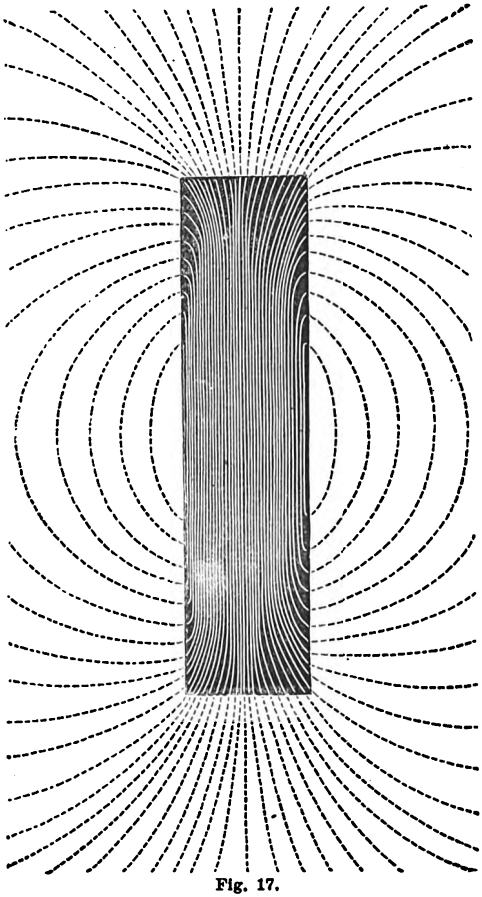


Fig. 17.

In der Figur 17 sind diese innern und äussern Linien dargestellt.

Es ist Jedem bekannt, dass beim Eintauchen eines solchen Magnetes in Eisenfeilspäne die kleinen Eisenstückchen vorzugsweise, jedoch nicht ausschliesslich an den Enden des Stabes hängen bleiben; hält man das Ende unter ein Kartenblatt und streut Eisenpfeilspäne auf das Papier, so erhält man Curven, wie die in

Digitized by Google

der Figur 17 dargestellten. Dieser Versuch beweist die Vertheilung der magnetischen Kräfte in dem äusseren Raum. Der im Innern des Eisenkörpers fliessende Magnetismus fängt an, sich seitwärts zu zerstreuen und schliesslich strömt der Rest als ein grosses Büschel am Ende aus. Die magnetischen Linien laufen herum bis zum andern Ende und treten dort wieder ein; diejenige Stelle, an welcher der Stahl im Innern am stärksten magnetisirt ist, liegt in der Mitte, wo Feilspäne äusserlich überhaupt nicht haften bleiben. Dieser Magnetismus pflanzt sich in Linien fort, die an der Oberfläche, ziemlich nahe den Enden des Stabes hervortreten; die Feilspäne haften da, wo der Magnetismus in dieser Weise durch die Fläche tritt. Am mittleren Theile des Stabes, wo das Metall wirklich am vollkommensten vom Magnetismus durchdrungen ist, haften die Späne nicht, dort befindet sich eine grössere Zahl von Linien auf das Quadratcentimeter, von denen keine an die Oberfläche tritt.

Der Raum ausserhalb des Magnetes, den die Kraftlinien von Pol zu Pol durchsetzen, heisst das magnetische Feld des Magnetes. In der Nähe der Pole ist das Feld offenbar kräftiger, d. h. die Linien liegen dort dichter zusammen, als entfernter von den Polen.

In dem Felde sind die Linien so gezogen oder gedacht, dass in irgend einem Punkte die Richtung der Linien in jenem Theile des Feldes die Richtung der resultirenden magnetischen Kraft in dem Punkte angibt. Ein einzelner freier Magnetpol, der in irgend einen Punkt des Feldes gebracht wird, sucht sich längs der magnetischen Linien zu bewegen, ein Nordpol nach der einen, ein Südpol nach der entgegengesetzten Richtung. Bringt man eine kleine, drehbar aufgehängte Compassnadel in irgend einen Punkt des Feldes, so stellt sie sich in die Richtung der magnetischen Linien an jenem Punkte ein. Bringt man eine Nadel unter eine gekrümmte magnetische Linie, und vermag sich die Nadel nicht nur zu drehen, sondern auch ihre gesammte Lage zu ändern, so wird sie seitwärts gestossen und zwar stets gegen die innere Seite der Curve. Kleine unmagnetisirte Nadeln sowie Eisenfeilspäne werden im magnetischen Felde durch den Einfluss des Magnetes magnetisirt, gedreht und mit den Linien eingestellt. Der Versuch, bei dem Eisenfeilspäne auf ein Papierblatt oder eine Glasplatte, die über einem Magnet sich befindet, gestreut werden, erläutert das vorhin Gesagte. Man erhält dann die

Digitized by Google

Figur 18, die zum Studium der Vertheilung der magnetischen Linien in dem umgebenden Feld geeignet ist.

Bei dem Studium der Elektromagnete an der Hand der neueren Auffassung vom magnetischen Kreise haben wir diese Erscheinungen nicht lediglich als äussere der Oberfläche entspringende, sondern auch als innere zu betrachten. Wir müssen Eisen und Stahl als gute Leiter der magnetischen Linien ansehen, wir haben zu berechnen, welcher Eisenquerschnitt zureicht, damit irgend eine geforderte Zahl magnetischer Linien durch ersteren dringe, ebenso haben wir die erforderliche magnetisirende Kraft zu berechnen, welche anzuwenden ist, um irgend eine bestimmte Zahl magnetischer Linien in einem Kreise zu Stande zu bringen. Zur Behandlung dieser Aufgaben sind Symbole und Definitionen nothwendig. Um die Grösse der magnetischen Kraft an irgend einer Stelle des magnetischen Feldes auszudrücken, ist es, wie vorhin erläutert, gebräuchlich, die Zahl der magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter anzugeben, welche an der fraglichen Stelle die Luft durchsetzen; die Grösse der Kraft im Felde (oder die Feldstärke, wie man häufig sagt), werde mit H bezeichnet. Die Bezeichnung magnetische Strömung wird oft zur Angabe der gesammten Zahl magnetischer Linien benutzt, welche den Kreis durchsetzen, die Zahl wird mit N wiedergegeben. Die Anzahl der magnetischen Linien auf das Quadratcentimeter für irgend ein Material nennt man die magnetische Induction oder einfach die Induction (auch Durchdringung [Permeation] oder innere Magnetisirung); hierfür diene der Buchstabe B.

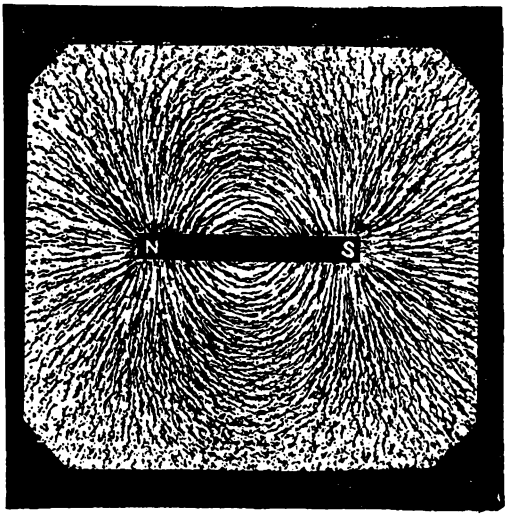


Fig. 18.

Da Eisen, Stahl und andere magnetische Materialien für magnetische Linien durchlässiger als Luft sind, so folgt, dass die Anwendung derselben magnetisirenden Kraft, welche H Linien für

Digitized by Google

das Quadratcentimeter in der Luft an irgend einem Punkte des Raumes hervorbringen wird, eine grössere Zahl von Linien auf das Quadratcentimeter erzeugt, wenn der Raum durch Eisen an Stelle von Luft ausgefüllt ist. Das heisst, dieselbe magnetisirende Krafte, welche H Linien für das Quadratcentimeter in der Luft erzeugen würde, würde B Linien für das Quadratcentimeter im Eisen erzeugen; B ist eine grössere Zahl als H, je nachdem die Durchlässigkeit des Materiales beschaffen ist. Hierüber enthält das Kapitel III über die Eigenschaften des Eisens das Nähere.

Elementare Sätze über Elektromagnetismus.

Es erscheint zweckmässig, einige elementare Sätze über die Beziehung zwischen elektrischen Strömen und magnetischen Kräften vorweg zu behandeln.

1. Magnetomotorische Kraft oder gesammte magnetisirende Kraft eines in einer Wickelung fliessenden Stromes.

   Fliesst ein Strom in einem Kupferdraht, der in mehreren Windungen um einen Kern gewickelt ist, sodass der Strom um einen innern magnetischen Kreis fliesst, so ist die magnetisirende Kraft oder das Bestreben der elektrischen Strömung sowohl proportional der Stromstärke als auch der Anzahl der Windungen der Wickelung. Unter sonst gleichen Umständen hängt die gesammte magnetisirende Kraft nur von den genannten beiden Umständen ab; sie ist unabhängig von der Abmessung oder dem Material des Drahtes oder von seiner Form; ebenso ist es gleich, ob die Spiralwindungen nahe zusammenliegen oder weit entfernt von einander sind. Bedeutet S die Zahl der Windungen der Wickelung, i die Stromstärke in Ampère, so ergibt das Product aus S und i die Zahl der Ampère-Windungen für die Strömung

Durch Versuche ist erwiesen, dass 20 Am., die durch 5 Windungen fliessen, genau dieselbe magnetisirende Kraft ausüben, wie 1 Am., die in 100 Windungen um den Kern fliessen. In jedem dieser Fälle erhält man 100 Ampère-Windungen. Um hieraus den Werth der magnetomotorischen Kraft in absoluten *CGS* Einheiten zu berechnen, hat man die Ampère-Windungen mit $0{,}4\,\pi$ oder mit 1,257 zu multipliciren.

$$\text{Magnetomotorische Kraft} = 1{,}257\ Si.$$

Im Anhang wird gezeigt werden, wie man den Gebrauch dieses Factors umgehen kann, indem die Ampère-Windungen selbst als magnetomotorische Kraft betrachtet werden.

Digitized by Google

Einige Schriftsteller bezeichnen die magnetomotorische Kraft als das „Linienintegral der magnetischen Kräfte".

2. Grösse der magnetichen Kraft an irgend einer Stelle einer langen magnetisirenden Wickelung.

Der vorhin gegebene Werth für die gesammte magnetisirende Kraft einer Wickelung gibt keine Belehrung über die Veränderung der magnetischen Kraft in verschiedenen Theilen. Wenn in der Figur 19 eine geschlossene Curve (die punktirte) durch sämmtliche Spiralwindungen gelegt und die Frage aufgeworfen wird, wie die Grösse der magnetischen Kraft an verschiedenen Punkten dieser Curve beschaffen sei, so muss erwidert werden, dass die Grösse der Kraft von Punkt zu Punkt sich sehr ändert, dass sie am grössten in der Mitte desjenigen Curventheiles ist, der innerhalb der Spiralwindung liegt. Wäre eine gleichmässig gewickelte Spule von sehr grosser Länge hergestellt (z. B. in der hundertfachen Grösse ihres Durchmessers), so würde, die Grösse der magnetischen Kraft längs der Spulenaxe überall fast gleich sein, ausgenommen an den nahe den Enden liegenden Stellen der Spule, wo die Kraft schnell abnimmt. Der Ausdruck für den Werth von H an irgend einer Stelle längs der Axe (abgesehen von der Nähe der Enden) bei einer solchen langen Wickelung wird in der Weise gefunden, dass man die magnetomotorische Kraft als gleichmässig auf die Länge vertheilt, betrachtet; bedeutet l die Länge der Wickelung in *cm* so ist

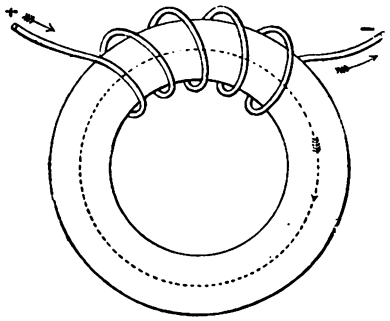


Fig. 19.

$H = 0{,}4\,\pi\,\frac{Si}{l}$ oder das 1,257 fache der Ampère-Wingungen für das Centimeter.

Ist ein Draht ringförmig auf einen Eisenring gewickelt, sodass die Wickelung keine Enden besitzt, so ist H an allen Punkten längs der geschlossenen Curve, welche im Innern der Spule gezogen wird, gleichförmig und wird, wie bekannt berechnet, indem man die mittlere Länge längs des Ringkörpers als l annimmt. Es leuchtet ein, dass, wenn H gleich-

Digitized by Google

förmig ist, das Produkt Hl die gesammte magnetisirende Kraft oder magnetomotorische Krtft ergibt.

3. Grösse der magnetischen Kraft in der Mitte eines einfachen Ringes.

In der Mitte eines Ringes oder einer kreisförmigen Drahtschleife mit dem Radius r, durch die ein Strom von i Am. Stärke fliesst, wird die Grösse der magnetischen Kraft aus der Formel

$$H = \frac{2\,\pi\,i}{10\;\;r} = 0{,}6284 \times \frac{\text{Ampère}}{\text{Radius}}$$

berechnet.

Dies trifft bei einer Tangentenbussole mit einem Ringe zu; enthält der Ring 5 Windungen, so ist die Zahl noch mit 5 zu multipliciren.

4. Kraft auf einen stromführenden Leiter im magnetischen Felde.

Wir nehmen an, dass ein magnetisches Feld durch einen Dauermagnet (Fig. 20) erzeugt werde, und ein stromführender Leiter in das Feld gebracht worden sei. Es wird dann eine mechanische Kraft beobachtet, die senkrecht zum Leiter und zu den magnetischen Linien des Feldes gerichtet ist.

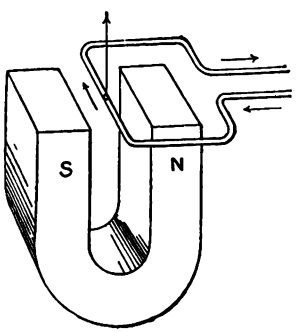


Fig. 20.

In der Figur läuft die Richtung der magnetischen Strömung horizontal von rechts nach links zwischen den Schenkeln des Magnetes, die Richtung des Stromes geht von vorn nach hinten; die entstehende mechanische Kraft ist bestrebt, den Leiter senkrecht aufwärts zu treiben, wie der Pfeil anzeigt. Kehrt man den Strom um, so erhält man eine abwärts gerichtete Kraft.

Die Grösse dieser Kraft kann in folgender Weise berechnet werden: Es sei ein Feld von gleichförmiger Stärke H gegeben, die Länge des Leiters, der rechteckig sich quer über dem Felde befindet, sei l *cm*, die Stromstärke sei i Am. Die Kraft in Dynen beträgt dann

$$f = \frac{H.\,l.\,i}{10}.$$

Digitized by Google

5. Arbeit, die durch einen stromführenden Leiter geleistet wird, der sich quer durch das magnetische Feld bewegt.

Bewegt sich der Leiter b *cm* quer durch das Feld, so beträgt die Arbeit in Erg.:

$$w = f.\ c = \frac{b.\ H\ l.\ i}{10}$$

bl ist die Fläche des Feldes, welche der Leiter durchmessen hat; diese Fläche multiplicirt mit der Zahl der magnetischen Linien für das Quadratcentimeter *(H)* ergibt die gesammte Zahl *N* der geschnittenen Kraftlinien, daher

$$w = \frac{N\ i}{10}$$

Beweis. Unabhängig hiervon lässt sich der Beweis, wie folgt, führen:

Nach dem Begriff des elektrischen Potentiales berechnet sich die Arbeit, wenn Q elektrische Einheiten von einem Punkte mit dem Potential V_1 bis zu einem Punkte mit dem Potential V_2 bewegt werden zu

$$w = Q\ (V_1 - V_2).$$

Werden nun N Linien des magnetischen Feldes in t Sekunden geschnitten, so wird eine elektromotorische Kraft $= N/t$ erzeugt; diese stellt die Potentialdifferenz dar und darf für diese gesetzt werden.

Drückt man die Stromstärke i in Am. aus, so beträgt die Strommenge in CGS Einheiten in t Sekunden $it/_{10}$

Setzt man also statt $V_1 - V_2$ den Werth N/t und statt Q den Werth $it/_{10}$ ein, so folgt:

$$w = Ni/_{10}.$$

6. Umlauf eines stromführenden Leiters um einen magnetischen Pol.

Besitzt ein Theil eines elektrischen Kreises bewegliche Verbindungen, so das er um einen Magnetpol sich drehen kann, so erfolgt Drehung. Das Drehungsmoment berechnet sich, wie folgt:

In der Figur 21 steht ein Stabmagnet senkrecht inmitten einer mit Quecksilber gefüllte Rinne.

In die Rinne taucht ein Draht, der aufgehängt und um einen Punkt beweglich ist Durch den Draht werde ein Strom von i Am. Stärke geleitet. Betägt die Polstärke m magnetische Einheiten,

Digitized by Google

so ist die Anzahl der von dem Pole aus radienförmig austretenden magnetischen Linien $= 4\,\pi\,m$; falls die Rinne sich nahe genug dem Magnet befindet, so werden sämmtliche Linien von dem Leiter während eines Umlaufes geschnitten. Nach dem Vorhergehenden ist daher die Arbeit während eines Umlaufes

$$w = 4\,\pi\,m\,i/_{10} = 0{,}2\,m\,i.$$

Durch Division mit dem Winkelmaass $2\,\pi$ erhält man das Drehungsmoment

$$\gamma = 2\,m\,i/_{10} = 0{,}2\,m\,i.$$

Es folgt daraus, dass der Pol um den Leiter in umgekehrter Richtung mit demselben Drehungsmoment umzulaufen bestrebt ist.

7. Jeder elektrische Kreis besitzt das Bestreben, seine Lage so zu ändern, dass die magnetische Strömung in ihm ein Maximum wird.

Dieses, mit andern Worten von Maxwell ausgedrückte Gesetz ist sehr dienlich zur Erkenntniss der Richtung, in der Leiter, die Theile von elektrischen Kreisen bilden und sich in einem magnetischen Felde befinden, sich zu bewegen bestrebt sind. Der in Figur 20 dargestellte Fall kann als Beispiel dienen. Der Strom fliesst in dem Kreise, wie die Figur zeigt, in der Pfeilrichtung und zwar rechts herum. Hierdurch wird, nach Massgabe der Regel auf Seite 43 eine magnetische Strömung im Kreise von oben nach unten hervorgebracht. Wegen des unterhalb befindlichen Nordpoles ist aber schon eine magnetische Strömung von entgegengesetzter Richtung in dem Kreise vorhanden. Der Kreis sucht sich demnach so zu bewegen, dass die Gegenströmung vermindert wird, dadurch verstärkt er thatsächlich seine eigene Strömung. Ein anderes Beispiel liefert der Versuch von De la Rive mit einer schwimmenden Spule, die von einem Pole eines Stabmagnetes angezogen und von dem andern Pol abgestossen wird.

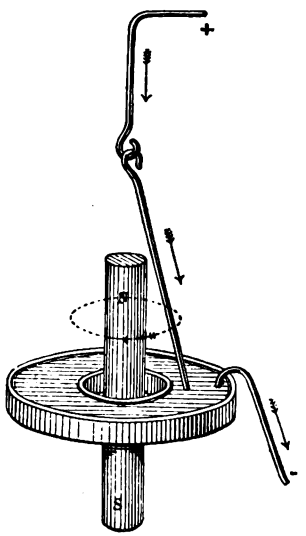


Fig. 21.

8. Zwei elektrische Kreise oder stromführende Leiter beeinflussen beiderseits ihre Lage so, dass die

Digitized by Google

gegenseitige magnetische Strömung ein Maximum werden kann.

Dieser Satz bildet eine verallgemeinerte Regel über die Anziehung und Abstossung paralleler Ströme und von Strömen, deren Richtungen einen Winkel bilden. Ein Strom zieht einen andern an oder stösst ihn ab lediglich vermöge des magnetischen Feldes, welches die Ströme in dem umgebenden Raum erzeugen. Fliessen zwei parallele Ströme in derselben Richtung, so bringt jeder Strom um sich selbst ein magnetisches Feld hervor, und jeder sucht sich seitwärts durch das magnetische Feld des andern hin zu bewegen. Liegen zwei Spulen von gleichem Durchmesser, wie in einer Tangentenbussole parallel und nahe zusammen, so ändert sich die gegenseitige Kraft umgekehrt wie der Axenabstand der Spulen und gerade wie das Product ihrer Ampère-Windungen.

Formen der Elektromagnete.

Wir wollen nunmehr die Eintheilung der Formen für Elektro-

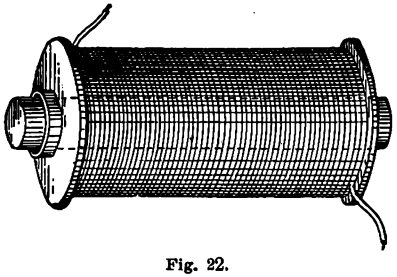


Fig. 22.

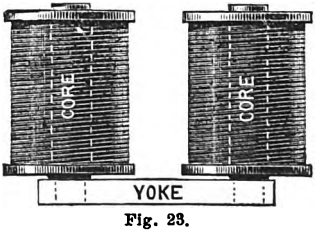


Fig. 23.

magnete behandeln, jedoch erhebe ich nicht den Anspruch, eine umfassende Eintheilung erzielt zu haben.

Nicklès hat ein eigenthümliches Werk veröffentlicht, in dem er unter 37 Abtheilungen alle denkbaren Arten von Magneten einreiht, bidromische, tridromische, monocnemische, multidromische — ich weiss nicht, wie viel mehr; seine Eintheilung ist nichtssagend und undurchführbar. Für unsern Zweck genügt es, diejenigen auszuwählen, die sich unter 4 oder 5 Hauptklassen bringen lassen und diejenigen, die nicht hier unterzubringen sind, besonders zu behandeln.

1. Stabförmiger Elektromagnet. Er besteht aus einem geraden Kern (solide, röhrenförmig oder geblättert), der von einer Wickelung umgeben ist. Die Figur 3 (Seite 3) stellt das älteste

Digitized by Google

Muster von Sturgeon dar. Die Figur 22 zeigt einen geraden Magnet mit cylindrischem Kern.

2. Hufeisenförmiger Elektromagnet.

Unter dieser Bezeichnung begreift man zwei Formen.

Der ursprüngliche Elektromagnet von Sturgeon (Fig. 1, S. 3) hatte wirklich eine Hufeisenform und war aus einem Stück runden Schmiedeeisens gefertigt, von etwa 12,7 *mm* Durchmesser und fast 0,3 *m* Länge, das bogenförmig hergerichtet wurde. Später wurde eine andere Form, wie sie die Figur 23 darstellt, bevorzugt.

Der Elektromagnet bestehe aus zwei besonderen Eisenkernen, die gewöhnlich runde Stäbe bilden und in ein drittes Eisenstück — das Joch — eingeschraubt oder eingelassen werden. Die von Joule hergestellte besondere Form ist in der Fig. 7, dargestellt.

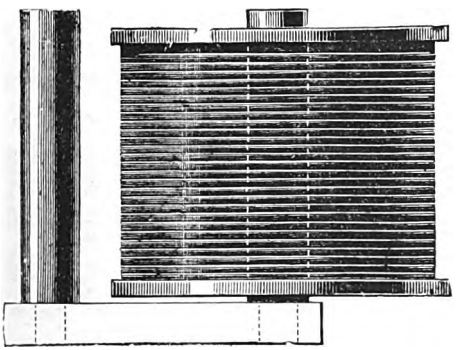


Fig. 24.

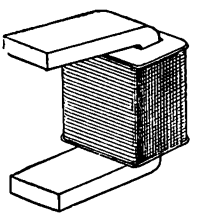


Fig. 25.

3. Einschenkeliger Elektromagnet.

Zuweilen wird die vorstehende Form in der Weise verändert, dass man nur eine Spule aufsetzt, während der andere Kern unbedeckt bleibt. In Frankreich nennt man diese Form aimant boiteux d. h. nur auf einer Seite ausgerüsteter Magnet[1]). Ueber diese in der Figur 24 dargestellte Form wird später noch mehr erwähnt werden.

---

1) Der Verfasser hat aimant boiteux englisch mit clubfoot wiedergegeben. Demgemäss sagt er, dass der deutsche Name „hinkender Magnet" sei. Dies ist nicht der Fall, sondern man sagt „einschenkeliger Elektromagnet". Aimant boiteux heisst auch keineswegs „hinkender Elektromagnet" sondern das Wort boiteux drückt aus, dass nur ein Schenkel bedeckt ist. Ruban boiteux ist z. B. ein Band, das nur auf einer Seite bezeichnet oder bedruckt ist. Anm. d. Ueb.

Digitized by Google

Der in Figur 25 dargestellte Elektromagnet kann als besondere Abänderung betrachtet werden, da er einen hufeisenförmigen Magnet mit einer Wickelung auf dem Joche darstellt, die beiden Schenkel aber unbedeckt sind.

4. Elektromagnet mit Eisenhülle. Er unterscheidet sich vom einfachen Stabmagnet dadurch, dass ein Eisengehäuse über der Wickelung angebracht und mit dem einen Ende des Kernes verbunden ist. Ein solcher Magnet, wie ihm die Fig. 26 zeigt, besitzt an dem einen Ende einen innern Pol, der von einem ringförmigen Pol entgegengesetzter Polarität umgeben ist. Der geeignete Anker für derartige Elektromagnete ist eine runde Scheibe oder ein eiserner Deckel. Eigenthümlich ist es, wie oft der Gebrauch einer Eisenhülle für einen Elektromagnet von Neuem erfunden worden ist. Die Erfindung reicht etwa bis zum Jahre 1850 zurück und ist für Romershausen, für Guillemin und für Fabre in Anspruch genommen worden[1]). Beschrieben ist die Form in Davis Magnetismus; dieses Buch wurde 1855 zu Boston veröffentlicht. Sechzehn Jahre später brachte Falkner aus Manchester die Form unter dem Namen Altandae Elektromagnet wieder auf.

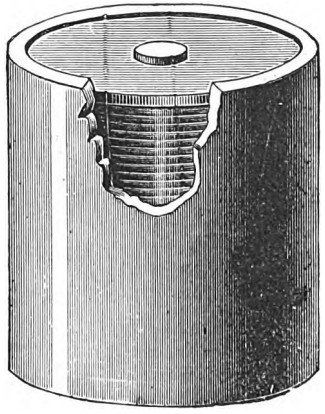


Fig. 26.

Eine Erörterung über umkleidete Elektromagnete fand 1876 in der Society of Telegraph Engineers statt. In demselben Jahre hatte Graham Bell die selbe Form für den in der Centennial Exhibition ausgestellten telephonischen Empfangsapparat verwendet. Es giebt verschiedene Formen von Elektromagneten, bei denen ein Theil des Eisens ausserhalb der Wickelung liegt, das Eisen geht von einem Ende oder von beiden aus, zuweilen in Form von zwei oder mehreren parallelen zurücklaufenden Jochen. Magnete solcher Form können mit dem Namen Elektromagnete mit Eisenhülle bezeichnet worden. Von Cromwell Varley ist ein solcher Magnet benutzt worden, in dem ein gerader Magnet zwischen zwei eisernen Kappen, die auf den Enden passen, sich

1) Nach Nicklès (Compt. Rend. XLV, 1857, S. 253) wurde er von Fabre erfunden, der einige Jahre vorher im Laboratorium von Nicklès in Paris gearbeitet hatte.

Digitized by Google

befindet; dadurch werden die Pole dicht zusammengebracht. Der kreisförmige Rand der einen Kappe bildet den Nordpol, der Rand der andern Kappe den Südpol, beide Ränder liegen dicht zusammen.

Eine neuere Art der Eisenumhüllung ist in der Fig. 27 dargestellt. Diese Form zeichnet sich durch einfache Construction und kräftige Wirkung aus. Sie wird bei elektromagnetischen Kuppelungen und Bremsen verwendet.

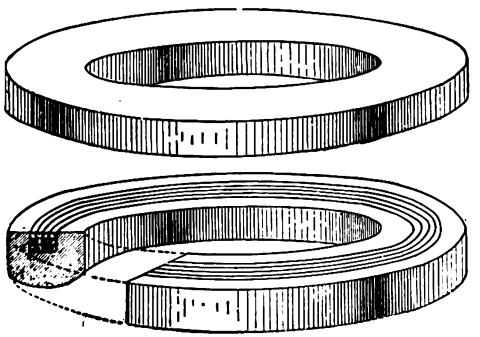


Fig. 27.

Ruhmkorff's Elektromagnet. Diese, zu Versuchen mit Diamagnetismus und die magnetische Ablenkung des Lichtes verwendete Form wurde 1846 hergestellt [1]).

Verdet gibt folgende Beschreibung des von ihm (Fig. 28) bei seinen magneto-optischen Versuchen verwendeten Elektro-

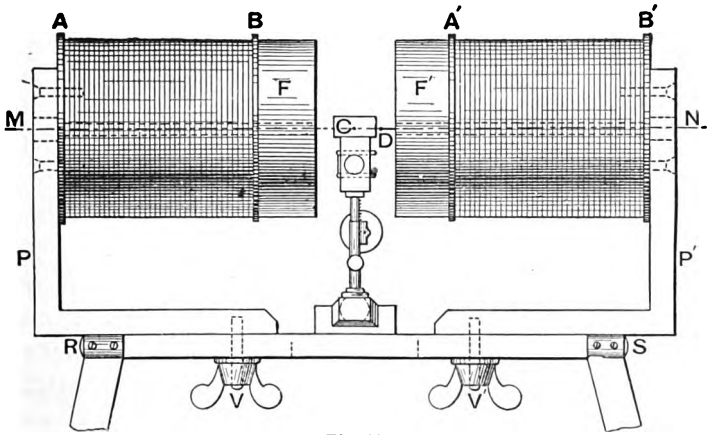


Fig. 28.

magnetes. Die Kerne sind aus zwei Cylindern *AB* und *A'B'* von weichem Eisen gebildet; jeder Kern ist 20 *cm* lang und 7,5 *cm* stark, sie sind der Länge nach durchbohrt, um einen Lichtstrahl durchzulassen. Mittels der Joche *PP'* aus weichem Eisen und

1) Ruhmkorff. Vgl. Compt. rend. XXIII, 417 und 538, 1846; Ann. de Chim. et de Phys. (3) XVIII, 318, 1846.

Digitized by Google

einer Bodenplatte aus demselben Material sind die Kerne mit einander verbunden. Zum Zwecke optischer Versuche, die ein sehr gleichmässiges magnetisches Feld bedingen, sind auf den Kernen cylindrische Polstücke *FF'*, jedes 14 *cm* im Durchmesser und 5 *cm* breit, aufgeschraubt. Die Wickelungen bestehen aus zwei Drahtspulen von je 250 *m* Länge, der verwendete Kupferdraht ist 2,5 *mm* stark. Verdet benutzte zu einer andern Untersuchung einen senkrecht stehenden, hufeisenförmigen Elektromagnet ähnlich dem in der Fig. 23 dargestellten; derselbe war mit durchlöcherten Polstücken ausgerüstet, wie Farday solche schon angewendet hatte.

5. Spule mit Kern zum Eintauchen.

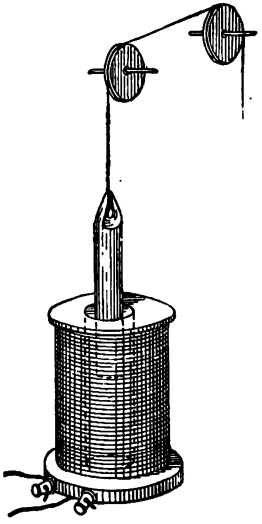


Fig. 29.

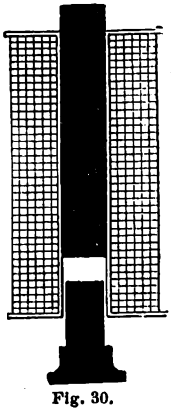


Fig. 30.

Wenn ein Strom durch die Wickelung einer Spule oder durch ein Solenoid fliesst, wird ein Eisenstück in den Hohlraum hineingezogen. Diese besondere Form des Elektromagnetes wird im Kapitel VIII eingehender behandelt werden. Es genügt hier die Bemerkung, das gewöhnliche Elektromagnete mit festen Kernen kräftig auf benachbarte Anker wirken, während der Bereich der Wirkung gewöhnlich sehr klein ist, dass andererseits der von der Spule auf den hineinzuziehenden beweglichen Kern ausgeübte Zug im Allgemeinen geringer ist, aber einen grösseren Wirkungsbereich besitzt.

Digitized by Google

6. Spule mit festem Kern und einem beweglichen Kern zum Eintauchen.

Eine Gruppe ist so angeordnet, dass die Form des Elektromagnetes zwischen der Form mit einer Spule und Kern zum Eintauchen und der gewöhnlichen Form mit festen Elektromagnet liegt.

Wenn die Wirkelung so angeordnet ist, dass sie, wie die Fig. 30 zeigt, einen festen Kern nur theilweise umschliesst, ein zweiter beweglicher Kern in die Wickelung hineingezogen und und dann von dem festen Kern angezogen werden kann, so wird die Wirksamkeit dieser Anordnung zwischen der schwachen, aber einen weiten Wirkungsbereich besitzenden Anordnung nach Fig. 29 und der kräftigen, aber einen engen Wirkungsbereich besitzenden Anordnung des gewöhnlichen Elektromagnetes sich befinden. Zuweilen haben derartige Formen auch eine Eisenhülle zur Verbesserung des magnetischen Kreises.

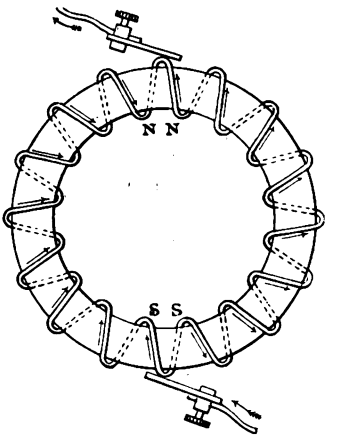


Fig. 31.

7. Elektromagnete mit Folgepolen.

Elektromagnete, die so gewickelt oder deren Wickelungen so mit einander verbunden sind, dass der Strom über verschiedene Kerntheile in entgegengesetzter Richtung fliesst, sind insofern bemerkenswerth, als sie sog. Folgepole besitzen. Der Ausdruck Folgepole besagt, dass zwischen zwei gleichartigen Polen ein entgegengesetzter hervorgebracht wird. Wenn ein stabförmiger Stahlmagnet z. B. so magnetisirt ist, dass er an jedem Ende einen Nordpol und in der Mitte einen Südpol besitzt, so nennt man den mittleren Pol Folgepol. Dieser ist so zu betrachten, als ob er zwei Südpolen magnetisch gleichwerthig wäre.

Elektromagnete mit Folgepolen kommen nicht häufig vor, ausgenommen in gewissen Formen von Dynamomaschinen und elektrischen Triebmaschinen, in denen sie zuweilen als besondere Arten von Feldmagneten, zuweilen als Anker vertreten sind. Als Beispiel kann der wohlbekannte Gramme'sche Ring dienen.

Es sei ein eiserner Kern (Fig. 31) in seiner ganzen Ausdehnung mit einer Kupferdrahtwickelung umgeben, die in sich

Digitized by Google

geschlossen ist. Wird in die Wickelung an der einen Seite ein Strom geleitet und fliesst derselbe an der entgegengesetzten Seite ab, so bieten sich zwei Wege für den Strom; auf der einen Hälfte des Ringes fliesst der Strom in den Windungen nach rechts herum, auf der andern Hälfte nach links herum.

Es ergibt sich dann, dass jede Ringhälfte wie ein Magnet wirkt, der einen Südpol an der Eintrittsstelle und einen Nordpol an der Austrittsstelle des Stromes besitzt. Mithin sind zwei Folgepole vorhanden, ein doppelter Nordpol an dem obern Theil und eine doppelter Südpol am untern Theil des Ringes. Die Lage dieser Pole ist veränderlich; es erfolgt eine Verschiebung um den Ring herum zu andern Punkten hin, sobald die Verbindungsstellen zwischen der Ringwickelung und dem Stromkreise verschoben werden. Dies bildet die wesentlichste Eigenschaft der eigenthümlichen elektromagnetischen Anordnung.

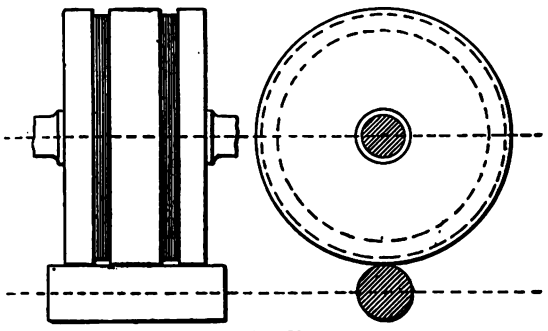


Fig. 32.

8. Kreisförmige Elektromagnete.

Diese Bezeichnung führt eine besondere, von Wilhelm Weber angegebene Klasse der Elektromagnete, die cylindrische oder scheibenförmige Kerne besitzen, auf denen in Nuten die Wickelung aufgebracht ist.

Wird eine eiserne Scheibe mit einer magnetisirenden Wickelung aus Kupferdraht belegt und durch einen Strom erregt, so wird die eine ganze Randfläche zum Nordpol, die andere zum Südpol. Ein solcher Magnet zieht an jedem Theile seines Umfanges Eisen an. Die Fig. 32 zeigt einen doppelten kreisförmigen Magnet, der in der Mitte einen Nordpol als Folgepol besitzt, während die beiden äussern Ränder Südpole sind. Es ist in Vorschlag gebracht worden, solche Elektromagnete an Stelle gezahnter Räder zu Triebwerken zu benutzen, indem die erforderliche Adhäsion der Oberfläche auf magnetischem Wege erreicht wird. In einer andern, von Nicklès stammenden Form, die man auch paracirculare nennt, ist die Wickelung nicht auf die Scheibe oder das

Digitized by Google

Rad gewickelt, sondern umgibt ausserhalb nur das Segment, das eine magnetische Berührung herbeiführen soll.

9. Verschiedene Formen.

Es gibt eine grosse Zahl abgeänderter Formen, von denen viele im letzten Theil dieses Buches Erwähnung finden. Nur zwei Arten seien hier angeführt.

Die Figur 33 stellt ein Bündel von Stabmagneten dar, jeder besitzt eine besondere Wickelung aus Kupferdraht, die Anordnung ist derart, dass die Pole abwechseln. Diese Form sollte einen kräftigen Elektromagnet zum Festhalten einer eisernen Platte bilden. Mit der gleichen Eisen- und Kupfermasse würde man eine kräftigere Wirkung erzielt haben, wenn eine andere Anordnung und ein einfacher magnetischer Kreis hergestellt worden wäre; es würde z. B. zweckmässiger gewesen sein, alle Kupferwickelungen in eine Spule um acht Kerne zu vereinigen, welche die beiden mittelsten Lagen bilden, die oberen und unteren Kerne aber ohne Wickelung zu lassen und nach Art der Elektromagnete mit Eisenhülle aus ihnen einen Rückweg für die magnetischen Linien zu bilden.

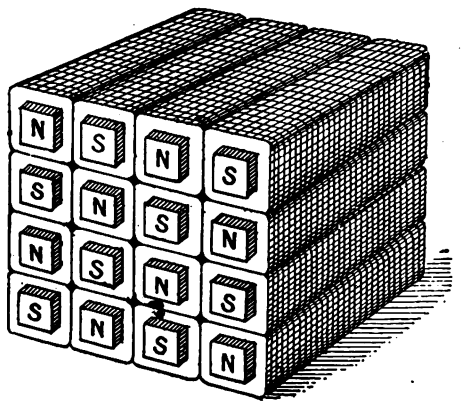


Fig. 33

Die Fig. 34 stellt einen Spiral-Elektromagnet dar. Der Eisenkern ist beträchtlich verlängert und in spiraligen Windungen um einen geraden Kupferleiter gelegt; die gebräuchliche Anordnung erscheint demnach umgekehrt. Die Abänderung bietet jedoch nicht den geringsten Vortheil, sondern sogar ernstliche Nachtheile. Denn in Folge der verhältnissmässig beträchtlichen magnetischen Durchlässigkeit der Luft wird der in jeder Windung der Spirale erzeugte Magnetismus zur andern übertreten und sich also in beträchtlichem Grade kurz schliessen, anstatt das Eisen zu durchdringen und zu den Polen auszutreten; ferner ist zur Magnetisirung

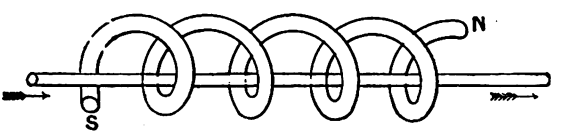


Fig. 34.

Digitized by Google

des Eisens ein sehr starker Strom erforderlich, weil anstatt der gebräuchlichen Windungen nur ein einzelner Leiter im elektrischen Kreise wirksam ist.

Zu den besprochenen Formen kommen noch viele andere, die nur für Feldmagnete von Dynamomaschinen und elektrischen Triebmaschinen verwendet werden. Der Leser wird in dieser Beziehung auf das Werk des Verfassers „Die dynamoelektrischen Maschinen“[1]) und auf das Kapitel XII, verwiesen.

Materialien zur Herstellung von Elektromagneten.

Zur Herstellung von Elektromagneten ist erforderlich:

1. Magnetisches Material für die Kerne;
2. Leitendes Material für die Wickelung;
3. Isolationsmaterial für die Wickelung.

1. Magnetisches Material für die Kerne.

Es kommt lediglich Eisen und Stahl in Frage, obgleich Nickel Kobalt und Magnetstein (ein Oxyd des Eisens) ebenfalls unter die magnetischen Materialien zu rechnen sind. Die magnetischen Eigenschaften des Eisens und des Stahles sind von so grosser Bedeutung, dass zu ihrer Besprechung ein besonderes Kapitel III bestimmt worden ist. Die mechanischen Eigenschaften sind so bekannt, dass eine Eröterung derselben nicht erforderlich ist.

2. Leitungsmaterial für die Wickelung.

Nur das allgemein verwendete Material braucht hier besprochen zu werden, nämlich Kupfer. Anstatt des Kupferdrahtes ist schon anderes Material versucht worden, z. B. Eisen, Neusilber und Silber.

Bei Verwendung des Eisens, eines magnetischen Materiales, dachte man, dass es in doppelter Hinsicht wirksam sein würde, wenn es als Stromleiter dient und zugleich von den magnetischen Linien durchdrungen ist. Die Verwendung ist indessen nicht zu billigen, denn eiserne Drähte besitzen zunächst einen viel grösseren elektrischen Widerstand als Kupferdrähte von gleicher Stärke, erhitzten sich mehr und verzehren mehr elektrische Energie, ferner liegen die isolirten, quer über den Kern gewickelten eisernen Drähte nicht günstig zur Fortleitung magnetischer Längslinien. Silber wollte man verwenden, um einen besseren Leiter als Kupfer

1) Zweite deutsche Ausgabe, bearbeitet von Grawinkel, Verlag von Wilhelm Knapp, Halle a. S.

Digitized by Google

zu besitzen. In den letzten Jahren ist man indessen dazu gelangt, besonders auf elektro-metallurgischen Wege, das Kupfer zu läutern und erzielt damit Kupfer, das in seinen Eigenschaften mit Silber wetteifert, in einigen Fällen sogar Silber in seiner Leitungsfähigkeit übertrifft. Kupfer von hoher Leitungsfähigkeit ist gegenwärtig ein stehender Handelsartikel; bei Herstellung von Elektromagneten sollte keins mit geringerer Leitungsfähigkeit als der von 98 % des reinen Kupfers verwendet werden.

Neusilber ist zu den Wickelungen für Elektromagnete wegen seiner geringen Leitungsfähigkeit ungeeignet, es besitzt nur etwa 8 % der Leitungsfähigkeit des reinen Kupfers; lediglich der Umstand spricht zu Gunsten des Neusilbers, dass seine geringe Leitungsfähigkeit bei allen Temperaturen fast gleich bleibt. Regeln zur Herstellung von Spulen aus Kupferdraht, die eine Anleitung über die Abmessungen und Masse des Drahtes enthalten, werden im Kapitel VI zur Erörterung kommen. Es möge übrigens hier gleich erwähnt werden, dass man nicht an Verwendung runder Drähte gebunden ist, wenngleich solche in der Regel für die Wickelungen kleiner Elektromagnete benutzt werden. Für grössere Wickelungen, die stärkere Leiter mit Rücksicht auf die grössere Stromstärke erfordern, bedarf der Leiter eines grossen Querschnittes. Runde Leiter von grossem Querschnitt sind in derartigen Fällen aus zwei Gründen nicht rathsam: sie sind schwierig zu biegen, und lassen in der Wickelung beträchtliche Zwischenräume. Deshalb ist es besser, Drahtlitzen zu verwenden, die aus 7 dünnen zusammengedrehten Einzeldrähten bestehen und mit passendem Isolationsmaterial besponnen sind, oder Drähte von rechteckigem Querschnitt zu benutzen, die entweder mittels rechteckig geformter Züge hergestellt oder aus schmalen Streifen von Kupfer gebildet und zusammengebunden worden sind. Alle Verfertiger vom Kupferdraht für elektrische Zwecke liefern gegenwärtig sowohl Litzendrähte als auch Drähte und Streifen von verschiedener Stärke, denn solche werden täglich bei der Herstellung von Dynamomaschinen und anderen elektrischen Maschinen erfordert.

3. Isolationsmaterial.

Isolationsmaterialien sind nothwendig, um den Uebergang des elektrischen Stromes aus einem Theil der Wickelung in den andern, und aus der Wickelung in den Kern zu verhindern. Die Wickelung muss auch mechanisch zusammengehalten werden, dies

Digitized by Google

wird durch Aufwindung der Wickelung auf eine Hülse ermöglicht. Falls die Hülse aus Holz, Ebonit, oder einem andern nichtmetallischen Material besteht, so wirkt sie selbst als Isolator und vermindert die Möglichkeit des Stromüberganges von der Wickelung zum Kern. Besteht die Hülse aus Metall, so muss man für Verhinderung des Stromüberganges aus der Wickelung in die Hülse Sorge tragen. Theoretisch hat ein Uebergangspunkt des Stromes aus der Wickelung zum Kern oder zur Hülse keine Bedeutung, da der Strom nicht längs einer solchen Stelle in das benachbarte Metall eintritt, wenn er nicht zugleich einen Rückweg zum Stromkreise findet. Wenn indessen eine solche mögliche Uebergangsstelle besteht, so wächst die Wahrscheinlichkeit des Bestehens einer andern Uebergangsstelle an einem zweiten Punkt, woraus eine Schwächung hervorgeht. Eine vollständige Isolirung der Wickelung ist deshalb äusserst wünschenswerth. Die Möglichkeit, dass ein Stromübergang oder Kurzschluss sich zwischen zwei Leitern bilden hängt von der elektrischen Spannung ab. Je grösser die Spannung zwischen zwei Punkten der Leiter ist, desto eher kann das isolirende Material zwischen den Leitern durchbrochen werden, sodass eine Uebergangsstelle gebildet wird. Zwischen einer Windung und der benachbarten in derselben Wickelungslage herrscht im Allgemeinen eine sehr geringe Spannung, eine bedeutendere aber zwischen dem Draht in der einen Lage und dem Draht der darüber befindlichen Lage. Deshalb ist es wichtiger, die einzelnen Lagen gut gegeneinander zu isoliren, als die einzelnen Windungen ein und derselben Lage. Aus demselben Grunde ist es noch wichtiger, die Wickelung von der Hülse zu isoliren, weil der Draht sämmtlicher Lagen dicht an den Backen am Ende der Hülse anliegt. Man schalte z. B. einen Elektromagnet in einen Stromkreis ein, der aus einer Dynamomaschine mit Strom von 100 Volt Spannung versorgt wird, d. h. zwischen den Hauptleitungen herrscht 100 Volt Potentialdifferenz. Der Elektromagnet besitze eine Wickelung von 20 Drahtlagen mit je 50 Windungen. Die Wickelung sei in der gewöhnlichen Art aufgebracht, beginne an dem einen Ende und laufe dann zurück, sodass die zweite Lage oberhalb der Stelle endet, wo die erste Lage beginnt. Wenn nun der Strom mit 100 Volt Spannung die Wickelung durchfliesst, so wird zwischen einem Punkt am Anfang einer Lage und einem Punkte am Ende der nächsten Lage oberhalb gerade $^1/_{10}$ der Wickelung sich befinden, deshalb zwischen diesen Punkten auch $^1/_{10}$ der Spannung, d. h.

Digitized by Google

10 Volt herrschen. Zwischen diesen beiden Punkten liegen 100 Drahtwindungen, die Spannung zwischen je zwei Windungen betägt deshalb nur $^1/_{10}$ Volt.

Da nun die Spannung zwischen dem einen Ende der Wickelung und dem andern Ende 100 Volt beträgt, und da beide Enden dicht an die Hülse treten, so ist die Gefahr, dass durch Ueberspringen der Elektricität in das Metall der Hülse ein Uebergang für den Strom möglich wird, weit grösser als die Gefahr eines Ueberspringens von Lage zu Lage.

Man darf näherungsweise annehmen, dass die elektrische Spannung im isolirenden Material d. h. die Neigung, das Material unter Funkenbildung zu durchschlagen — proportional dem Quadrate der in Volt ausgedrückten verwendeten Spannung ist. In dem vorhin erwähnten Falle würde das Isolationsmaterial zwischen der Wickelung und der Hülse eine 100 mal so grosse Spannung auszuhalten haben, als die Spannung zwischen zwei Lagen beträgt, und eine Million mal so grosse Spannung, als zwischen je zwei Drahtwindung herrscht.

Isolation des Drahtes.

Für grosse Elektromagnete, die in gewöhnlichen Kreisen bei einer 500 Volt nicht übersteigenden Spannung verwendet werden sollen, genügt es, Draht mit einer doppelten Lage Baumwolle zu benutzen. Die Umspinnung muss gut mit Firniss getränkt und einige Stunden lang stark getrocknet werden. Für die zu telegraphischen, telephonischen und Weckerzwecken bestimmten kleinen Elektromagnete ist Draht mit Seidenumspinnung vorzuziehen. Die Wickelungen werden gut getrocknet und in ein Bad von geschmolzenem Paraffin getaucht.

Ueberzug aus Guttapercha oder Kautschuk, getheertem Hanf oder Ozokeritband sind zu Wickelungen für Elektromagnete nicht zu empfehlen. Starke Litzendrähte und rechteckige Leiter sollten mit starkem baumwollenem Band bewickelt und nach dem Aufwinden auf die Hülsen mit Schellackfirniss bestrichen werden.

Isolation der Lagen.

Die Isolation der einzelnen Lagen, besonders die zwischen der ersten Windung einer Lage und der letzten Windung der foldenden muss gut sein. Bei Herstellung kleiner Elektromagnete braucht man nur bei Anfertigung der Wickelung Sorgfalt zu beobachten; werden indessen grössere Elektromagnete mit vielen Windungen feinen Drahtes bewickelt und soll die Wickelung in

Digitized by Google

Stromkreise bei hoher Spannung eingeschaltet werden, so thut man wohl, zwischen die Lagen dünnes „Willesden" Papier, dünnes Papier aus vulkanisirter Faser, dünnen Canevas oder mit Schellack gefirnisstes Baumwollengewebe zu legen.

Isolation des Kernes und der Hülse.

Sollen Wickelungen unmittelbar auf die Kerne ohne Benutzung einer Hülse gewickelt werden, so muss man den Kern selbst gut isoliren. Dies erfolgt durch Bestreichen des Kernes mit irgend einer zähen, nicht leitenden Farbe, durch Umkleidung mit gefirnisstem Canevas, durch Ueberdecken mit einer gut passenden Röhre aus vulkanisirter Faser oder durch Belegen mit einigen Lagen gut gefirnissten, zähen Papieres. Metallhülsen kann man in gleicher Weise behandeln. Die Flächen an den vorragenden Backen der Hülsen sollten möglichst vollkommen und sorgfältig geschützt werden.

Sind die Wickelungen unmittelbar auf den Kernen aufgebracht, so werden häufig Backen (flache Ringe) aus Metall zum Festhalten der Wickelung an den Enden) benutzt. Mögen derartige Metallstücke unmittelbar an den Kernen oder an einer besondern Hülse angebracht sein, so müssen sie bei allen grossen Elektromagneten von den Wickelungen durch eine Lage vulkanisirter Faser, Pergamentpapier oder in Ermangelung solcher Materialien, durch ölgetränktes Zeug oder zähes, gefirnisstes oder mit Schmelz bedecktes Papier getrennt werden. Nur durch solche Vorsichtsmassregeln lassen sich Uebergangsstellen für den Strom verhindern. Störung verursacht häufig das Drahtende, welches von der innersten Lage der Wickelung nach Aussen zu führen ist. Dasselbe bricht zuweilen ab und verursacht die Nothwendigkeit einer Neuwickelung, oder, wenn es auch nicht gebrochen ist, so lockert es sich und gefährdet die isolirenden Lagen zwischen sich und den andern Theilen der Wickelung. In vielen Fällen ist es daher zweckmässig, vor Herstellung der Wickelung dieses Ende als besonderen starken Draht oder Drahtlitze oder als Kupferstreifen herzustellen und besonders gut zu isoliren.

Feuersichere Isolation. Es erscheint zuweilen erforderlich, eine Isolation vorzusehen, die auch beim Rothglühen der Wickelungen Stand hält. In solchem Falle ist Asbest das allein zulässige Material für die Bedeckung der Drähte; Asbestplatten und Glimmer lassen sich zu isolirenden Zwischenlagen verwenden.

Auch isolirende Farbe, die Asbest enthält, lässt sich herstellen. Ein blanker Kupferdraht, mit einem ziemlich starken

Digitized by Google

Asbestfaden als Zwischenlage kann als Wickelung dienen, während Asbesttuch auf die einzelnen Lagen der Drähte gebracht wird. Plättchen oder Ringe aus Steingut kann man einsetzten, um die Enden der Wickelungsdrähte herauszuführen.

Isolation gegen hohe Spannung.

Will man Elektromagnete zur Verwendung in Stromkreisen herstellen, in denen mehr als 1 000 Volt Spannung herrscht, so ist es unbedingt nothwendig, sowohl die Drahtlagen untereinander, als auch die Wickelung von der Hülse möglichst vollkommen zu isoliren. Gefirnisstes Papier, Canevas und vulkanisirte Faser ist dann nicht geeignet. Es lassen sich mit Vortheil nur dünne Lagen von Glimmer und Platten von gutem Ebonit verwenden.

Anstatt die Wickelungen in Lagen anzufertigen, werden diese zuweilen zwischen Scheidewände aus Ebonit gelegt, die in Zwischenräumen an einer den Kern umschliessenden Ebonitröhre befestigt sind; diese Art der Wickelung findet in der Regel beim Aufbau von Inductionsspulen Verwendung. Ozokeritisirtes Papier in verschiedenen aufeinander folgenden Lagen, die in heissem Zustande gepresst worden sind (wie bei den Ferranti'schen Leitungen) scheint das einzige andere Material zu sein, das für den genannten Zweck ebenfalls der Erwähnung werth ist.

Digitized by Google

Kapitel III.

Eigenschaften des Eisens.

Die Kenntniss der magnetischen Eigenschaften der verschiedensten Eisensorten bildet eine unerlässliche Grundlage für die Theorie und den Entwurf von Elektromagneten. Es bedarf deshalb auch keiner Begründung, das dieser Gegenstand ausführlich zu behandeln ist. In allen neueren Abhandlungen werden die gebräuchlichen Grössen bestimmt und erklärt, einige derselben findet sich Kapitel II erläutert. Während früher der Magnetismus so angesehen wurde, als wenn er auf den Endflächen der Magnete vertheilt sei, weiss man jetzt, dass er eine Erscheinung ist, die mit der inneren Beschaffenheit zusammenhängt; die geeignete Art der Betrachtung ist die Behandlung der magnetischen Materialien von dem Gesichtspunkt aus, dass sie als gute Leiter für die magnetischen Kraftlinien wirken oder mit andern Worten, dass sie magnetische Durchlässigkeit besitzen. Der genaue Begriff, der in diesem Worte liegt, lässt sich durch einen Zahlenfactor ausdrücken. Es wirke z. B. eine magnetische Kraft — sie werde durch einen Strom in einer Wickelung erzeugt — auf einen lufterfüllten Raum, so ergibt sich in dem Raum das Vorhandensein einer bestimmten Zahl magnetischer Linien. Die durch den Buchstaben H ausgedrückte magnetische Stärke wird häufig in der Weise bestimmt, dass man sagt, es werden H magnetische Linien für das *qcm* Luft hervorgebracht. Wird nun der Raum, auf den die magnetische Kraft wirkt, mit Eisen anstatt mit Luft ausgefüllt, so werden in Folge der grösseren magnetischen Kraft des Eisens eine grössere Zahl magnetischer Linien für das *qcm* erzeugt. Diese grössere Zahl im Eisen drückt den Grad der Magnetisirung des Eisens aus, man bezeichnet ihn mit dem Buchstaben B. Das Verhältnis von B zu H giebt die Durchlässigkeit des Materials an

Digitized by Google

und als Zeichen für die Durchlässigkeit wird der griechische Buchstabe μ benutzt. Hiernach ist $B = \mu H$[1]).

Es wurde z. B eine bestimmte Eisensorte einer magnetischen Kraft ausgesetzt und erzeugte in der Luft 50 magnetische Linien für das *qcm*; man fand aber, dass sie nicht weniger als 16062 magnetische Linien auf das *qcm* durchliess. Dividirt man letztere Zahl durch erstere, so ergibt sich als Werth für die Durchlässigkeit bei dem bewirkten Zustand der Magnetisirung der Werth 321, d. h. die Durchlässigkeit des Eisens war 321 mal grösser als die der Luft.

Die Durchlässigkeit unmagnetischer Materialien, z. B. von Seide, Baumwolle oder andern Isolatoren, ebenso die Durchlässigkeit von Messing, Kupfer und allen unmagnetischen Metallen wird = 1 angenommen, d. h. von derselben Grösse wie die der Luft.

Die bestimmte Bezeichnung der Thatsachen wird indessen dadurch verwickelt, dass alle Eisensorten das Bestreben der magnetischen Sättigung besitzen. Bei sämmtlichen Eisensorten wird die Magnetisirbarkeit des Materials geringer, wenn die Magnetisirung fortschreitet. Mit andern Worten, sobald ein Eisenstück bis zu einem gewissen Grade magnetisirt worden ist, wird es von diesem Zustande ab gerechnet, für die weitere Magnetisirung weniger durchlässig; obgleich nun die wirkliche Sättigung niemals erzielt wird, so gibt es doch eine praktische Grenze, über die hinaus die Magnetisirung nicht weiter getrieben werden kann.

---

1) Es werden mit B, H und μ folgende gleiche Begriffe bezeichnet:

mit B:

Innere Magnetisirung.
Magnetische Induction.
Induction.
Stärke der Induction.
Permeation.
Zahl der magnetischen Linien im Material.

mit H:

Magnetisirende Kraft an einer Stelle.
Magnetische Kraft an einer Stelle.
Stärke der magnetisirenden Kraft.
Zahl der magnetischen Linien für das *qcm* in der Luft.

mit μ.

Magnetische Durchlässigkeit.
Durchlässigkeit.
Spezifische Leitungsfähigkeit für magnetische Linien.
Magnetische vervielfachende Kraft des Materiales.

Digitized by Google

Joule war einer der ersten, der dies feststellte. Neuere Untersuchungen haben zahlenmässig dargelegt, wie sich die Durchlässigkeit vermindert, wenn die Magnetisirung zu höheren Graden fortschreitet. Die praktische Grenzen der Magnetisirung (B) beträgt für gutes Schmiedeeisen 20000 magnetische Linien für das *qcm*, für Gusseisen nahezu 12000 Linien für das *qcm*.

Bevor bei dem Entwurf von Elektromagneten bezüglich der Grösse des Eisenstückes, das zu einem bestimmten Zweck als Kern des Magnetes dienen soll, Berechnungen angestellt werden können, ist es nothwendig, die magnetischen Eigenschaften des Eisenstückes zu kennen; denn wenn das Eisen eine geringere Durchlässigkeit besitzt, so ist klar, dass man ein grösseres Stück braucht um die gleiche magnetische Wirkung hervorzubringen, als solche von einem kleineren Stück von höherer Durchlässigkeit hervorgebracht werden würde. Andererseits ist mehr Kupferdraht zur Wickelung erforderlich, wenn das Eisenstück geringere Durchlässigkeit besitzt, denn um die Magnetisirung bis zu dem erforderlichen Punkte zu steigern, muss man das Stück grösserer magnetisirender Kraft aussetzen, als für ein Stück mit höherer Durchlässigkeit nothwendig gewesen wäre. Zum Studium der magnetischen Beobachtungen bei irgend einer Eisensorte zeichnet man zweckmässig die Curve der Magnetisirung auf, d. h. die Curve, deren Abscissen die magnetische Kraft H darstellen und deren Ordinaten der Magnetisirung B entsprechen. Die Figur 35 (nach den Untersuchungen von Ewing[1]) zeigt fünf Curven für weiches Eisen, gehärtetes Eisen, geglühten Stahl, hart gezogenen Stahl und glasharten Stahl. Sämmtliche Curven besitzen dieselbe Grundform. Für kleine Werthe von H sind die Werthe von B klein, beim Anwachsen von H wächst B ebenfalls. Die Curve steigt ferner plötzlich an, wenigstens bei allen weicheren Eisensorten, biegt sich dann um und verläuft beinahe horizontal. Befindet sich

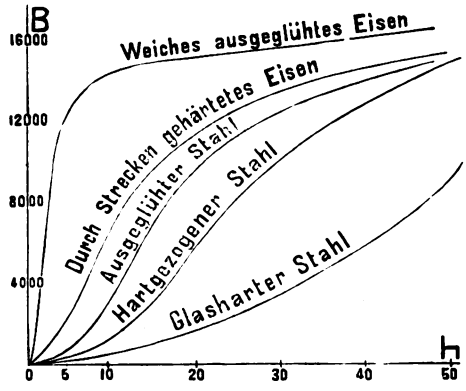


Fig. 35.

1) Phil. Trans. 1885.

Digitized by Google

die Magnetisirung in dem Zustande unterhalb des Kniees der Curve, so sagt man, das Eisen ist vom Zustande der Sättigung weit entfernt.

Ist aber die Magnetisirung bis jenseits des Kniees fortgeschritten, so nähert sich das Eisen der Sättigung; bei diesem Zustande der Magnetisirung ist ein starkes Anwachsen der magnetisirenden Kraft nothwendig, um eine nur geringe Zunahme der Magnetisirung hervorzubringen. Es mag bemerkt werden, dass weiches Eisen dem Zustand der Sättigung sich nähert, wenn B den Werth von etwa 16000 Linien für das *qcm*, oder wenn H den Werth von etwa 50 erreicht hat. Wir werden sehen, dass es nicht wirthschaftlich ist, den Werth von B über die angegebene Grenze zu steigen, d. h. es lohnt sich nicht, eine stärkere magnetische Kraft anzuwenden als eine solche, bei der H den Werth 50 besitzt.

Methoden zur Messung der Durchlässigkeit.

Es gibt vier Arten der Methoden, um die Durchlässigkeit mittels Versuchen zu bestimmen:

1. Magnetomotorische Methoden.

Dieselben rühren von Müller her; bei ihrer Ausführung wird der zu untersuchende Eisenstab mit einer Magnetisirungsspule umgeben und die Ablenkung beobachtet, die von der Magnetisirung in einem Magnetometer hervorgebracht wird.

2. Gleichgewichtsmethoden.

Die Methoden bilden eine Abart der vorher genannten; es wird ein Ausgleichungsmagnet verwendet, um die durch das magnetisirte Eisen auf die Nadel des Magnetometers hervorgebrachte Einwirkung abzugleichen.

Von Feilitsch benutzte diese Methode; eine bestimmtere Verwendung fand sie in der magnetischen Waage von Professor Hughes. Der Verfasser hat eine grosse Zahl von Beobachtungen an verschiedenen Proben von Eisen und Stahl anstellen lassen, keine der genannten Methoden lässt sich mit den folgenden indessen in Vergleich bringen.

3. Inductionsmethoden.

Es wären verschiedene solcher Methoden namhaft zu machen; sie hängen sämmtlich mit der Erzeugung eines vorübergehenden Inductionsstromes in einer Versuchswickelung zusammen, die das zu untersuchende Eisen umgibt. Der Integralstrom ist proportio-

Digitized by Google

nal der Zahl der in die Spule eintretenden oder aus ihr tretenden magnetischen Linien. Es mögen drei Arten dieser Methode Erwähnung finden:

A. Ringmethode.

Diese Methode stammt von Kirchhoff. Das zu untersuchende Eisen wird zu einem Ringe geformt, der mit einer primären (erregenden) und einer sekundären (Untersuchungs-)Wickelung versehen wird. Nach dieser Anordnung wurden Versuche von Stoletow, Rowland, Bosanquet und Ewing, sowie von Hopkinson ausgeführt.

Roland's Anordnung der Versuche ersieht man aus der Figur 36, in der B die erregende Batterie, S ein Stromwender, R ein regulirbarer Widerstand, A ein Strommesser und BG das ballistische Galvanometer bedeutet, dessen erster Ausschlag den inducirten Integralstrom misst.

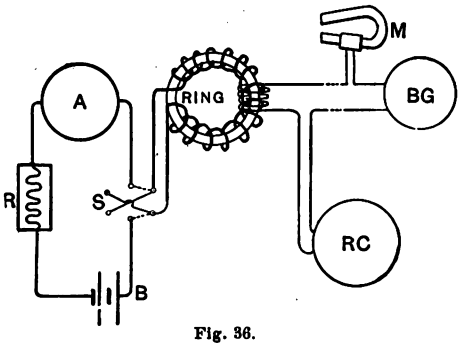


Fig. 36.

RC ist ein Erdinductor oder eine Wickelung zum Umlegen und dient zum Aichen der Ablösungen am Galvanometer; oberhalb findet sich noch eine Wickelung und ein Magnet angeordnet zu dem Zwecke, die schwingende Nadel zwischen je zwei Beobachtungen zur Ruhe zu bringen. Die erregende Wickelung sowie die zur Untersuchung dienende Wickelung sind beide auf den Ring gewickelt, die erregende Wickelung ist etwas stärker gezeichnet. Gewöhnlich beginnt man bei der Untersuchung mit einem schwachen erregenden Strom, der plötzlich umgekehrt und darauf wieder in die erste Richtung gebracht wird. Der Strom wird dann verstärkt, umgekehrt und nochmals umgekehrt, und so weiter, bis man die stärksten Anschläge ermittelt hat. Die Werthe des magnetisirenden Kraft H werden aus dem beobachteten Werth des Stromes in folgender Weise ermittelt: Ist die am Strommesser beobachtete Stromstärke i, die Anzahl der erregenden Windungen S und die Spulenlänge in cm (d. h. der mittlere Umfang des Ringes) l, so ist

Digitized by Google

$$H = 0{,}4\,\frac{\pi\, Si}{l} = 1{,}2566\,\frac{Si}{l}$$

Bosanquet erhielt bei seinen Versuchen mit einer Anzahl von Ringen wichtige Ergebnisse.

In der Figur *37* sind die Werthe von H und B für sieben Ringe dargestellt. Einer der Ringe, J, bestand aus Gussstahl und wurde untersucht, als er weich, und als er gehärtet war. Der mit I bezeichnete bestand aus dem besten Lowmoor-Eisen. Die fünf anderen bestanden aus Kroneisen und hatten verschiedene Grösse; sie sind mit G, E, F, H und K bezeichnet. In der nachstehenden Tafel sind die Werthe von B bei verschiedenen Zuständen der Magnetisirung enthalten.

	G	*E*	*F*	*H*	*K*
Ringdurchmesser	*cm* 21,5	10,035	22,1	10,735	22,725
Stärke des Ringes	*cm* 2,535	1,298	1,192	0,7137	0,7544
Magnetisirende Kraft					
0,2	126	73	62	82	85
0,5	377	270	224	208	214
1,0	1449	1293	840	675	885
2,0	4564	3952	3533	2777	2417
5,0	9900	9147	8293	8479	8884
10,0	13023	13357	12540	11376	11388
20,0	14911	14653	14710	14066	13273
50,0	16217	15704	16062	15174	13890
100,0	17148	16677	17900	16134	14837

Die Inductionsmethode zur Bestimmung der Durchlässigkeit mag an folgendem Beispiel näher erläutert werden. Es stehe ein Eisenring mit einem Querschnitt von einem Quadratcentimeter zur Verfügung. Der Ring wird mit einer erregenden Wickelung versehen, durch die ein Strom aus zwei Sammlerzellen geleitet wird; über diese Wickelung wird eine Untersuchungswickelung von 100 Windungen (wie bei der Anordnung von Rowland) gelegt und mit einem ballistischen Galvanometer verbunden, die Ausschläge werden durch Ablenkung der Lichtscheines abgelesen. Im Stromkreis des Galvanometers befindet sich auch eine Erdinductionsspule zum Umlegen. Diese Spule sei von solcher Grösse und

Digitized by Google

bestehe aus so vielen Drahtwindungen, dass, wenn sie umgelegt wird, der Betrag der geschnittenen Kraftlinien gleich 840,000 ist. Durch Abgleichung des Widerstandes im Kreise des Galvanometers werde erreicht, dass bei dem plötzlichen Umlegen der Erdinductionsspule das Galvanometer einen Ausschlag von 8,4 Scalentheilen zeigt. Da die Spule zur Untersuchung 100 Windungen besitzt, so folgt daraus, dass, wenn wir bei einem Versuch mit dem Ringe einen inducirten Strom erhalten, jeder Theilstrich der Scala 1000 Linien im Eisen angibt (840,000 : 8,4 × 100). Das Galvanometer möge nun 11 Theilstriche angeben, bei Unterbrechung des Stromkreises zeigt es nahezu 11 Theilstriche in entgegengesetzter Richtung. Daraus ergibt sich, dass die magnetisirende Kraft

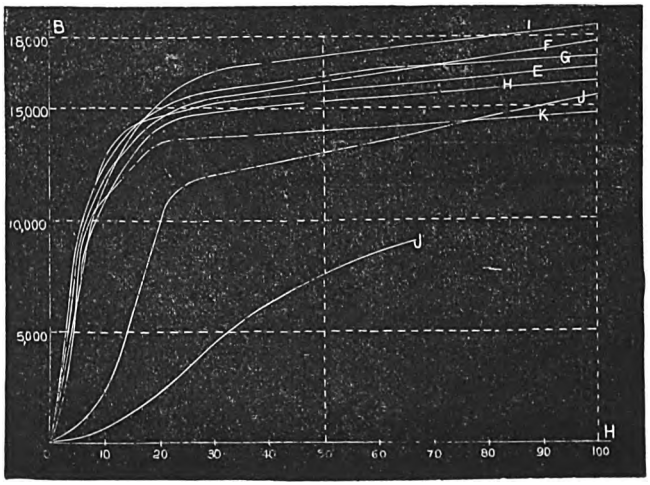


Fig. 37.

die Magnetisirung des Eisens auf 11000 Linien bringt; da der Querschnitt 1 *qcm* beträgt, so ist $B = 11000$. Wenn nun die erregende Wickelung 180 Windungen besitzt und der erregende Strom gerade 1 Am. beträgt, so wirken genau 180 Ampère-Windungen. Nach Massgabe der vorhin gegebenen Regel sind diese mit 1,2566 zu multipliciren und durch den Umfang zu dividiren, dessen Länge etwa 32 *cm* betrage. Dies ergibt $H = 7$. Wenn demnach $B = 11000$ und $H = 7$ ist, so wird die Durchlässigkeit (das Verhältniss der beiden Grössen) = 1570 sein. Dieser rohe Versuch kennzeichnet die Methode.

Die Versuche von Bosanquet bestimmen auch, ob die äussern Schichten eines Eisenkernes die innern Schichten vor den Ein-

Digitized by Google

wirkungen der magnetisirenden Kraft schützen. Wäre dies der Fall, so müssten die Ringe aus dünnerem Stabeisen höhere Werthe von B liefern als dickere Ringe. Dem ist aber nicht so: denn der dickste Ring G zeigt durchweg die höchsten Magnetisirungen (vgl. Fig. 37).

B. Stabmethode.

Bei dieser Methode wird an Stelle eines Ringes ein langer Eisenstab verwendet. Auf seiner ganzen Länge wird der Stab mit der erregenden Wickelung belegt, während die Untersuchungswickelung nur aus wenigen Drahtwindungen besteht, die genau in der Mitte des Stabes aufgebracht sind. Rowland, Bosanquet, und Ewing haben diese abgeänderte Methode benutzt; Ewing verwendete Stäbe, deren Länge das Hundertfache ihres Durchmessers betrug, um die Fehler auszugleichen, die von den Wickelungen der Enden herrühren.

C. Methode unter Verwendung eines getheilten Stabes.

Diese von Hopkinson stammende Methode wird durch die Figur 38 erläutert.

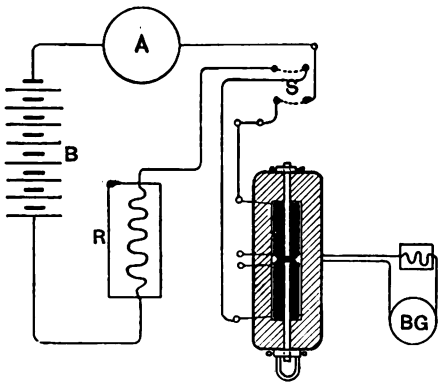


Fig. 38.

Der Apparat besteht aus einem Stück ausgeglühten Schmiedeeisens von etwa 45,7 *cm* Länge, 16,5 *cm* Breite nnd 5,1 *cm* Stärke, die Mitte des Stückes ist rechteckig ausgeschnitten nnd nimmt die magnetisirende Wickelung auf.

Die eisernen Versuchsstücke bestehen aus zwei Stäben von 12,65 *mm* Durchmesser, die sorgfältig abgedreht sind und in Bohrungen des Eisenblocks passen. Beide Stäbe stossen in der Mitte znsammen, ihre Enden sind genau abgeschliffen, sodass sie sich innig berühren. Der eine Stab wird festgelegt, an dem zweiten befindet sich eine Handhabe, um ihn herausziehen zu können. Die beiden Magnetisirungsspulen stossen nicht zusammen, sondern es bleibt zwischen ihnen ein Zwischenraum. In diesen Raum wird die kleine Untersuchungsspule gebracht, die auf eine Hülse aus Elfenbein gewickelt ist; der bewegliche Stab lässt sich durch die Hülse schieben. Die Untersuchungswickelung wird mit dem ballistischen Galvanometer BG verbunden und ist an einer Kautschuk-

Digitized by Google

feder befestigt (aus der Figur nicht ersichtlich), die, wenn der Stab plötzlich zurückgezogen wird, ihn plötzlich aus dem magnetischen Felde entfernt. Die Untersuchungswickelung besass 350 Windungen aus feinem Draht, die beiden magnetisirenden Wickelungen hatten 2008 Windungen. Der von einer aus 8 Grove'schen Zellen bestehenden Batterie B erzeugte magnetsirende Strom wurde mittels eines Flüssigkeitswiderstandes R und eines Nebenschlusses regulirt. Ein Stromwender sowie ein Strommesser A befanden sich im magnetisirenden Stromkreise. Die Versuchsstäbe konnten mit Hülfe. dieser Anordnung jeder kleinen oder grossen magnetisirenden Kraft unterworfen werden; die thatsächliche magnetische Bedingung konnte man jederzeit durch Unterbrechung des Kreises und gleichzeitig durch Herausziehen des beweglichen Stabes prüfen. Der Apparat erlaubte deshalb die Beobachtung einer Reihe von zunehmenden oder abnehmenden Magnetisirungen, ohne das zwischendurch Umkehrungen des Stromes stattfanden. 35 Eisenproben von bekannter chemischer Zusammensetzung wurden von Hopkinson geprüft, die beiden wichtigsten Proben bestanden aus geglühtem Schmiedeeisen und grauem Gusseisen, da diese Eisensorten von Mather und Platt bei Dynamomaschinen verwendet werden. Hopkinson stellte die Ergebnisse als Curven dar, aus diesen

Ausgeglühtes Schmiedeeisen.			Graues Gusseisen..		
B	μ	H	B	μ	H.
5000	3000	1,66	4000	800	5
9000	2250	4	5000	500	10
10000	2000	5	6000	279	21,5
11000	1692	6,5	7000	133	42
12000	1412	8,5	8000	100	80
13000	1083	12	9000	71	127
14000	823	17	10000	53	188
15000	526	28,5	11000	37	292
16000	320	50	—	—	—
17000	161	105	—	—	—
18000	90	200	—	—	—
19000	54	350	—	—	—
20000	30	666			

Digitized by Google

lassen sich mit hinreichender Sicherheit zu Zwecken der Berechnung Zahlenangaben gewinnen.

Die Tafel Seite 68 enthält die Zahlenwerthe, die Figur 39 die Curve für ausgelühtes Schmiedeeisen.

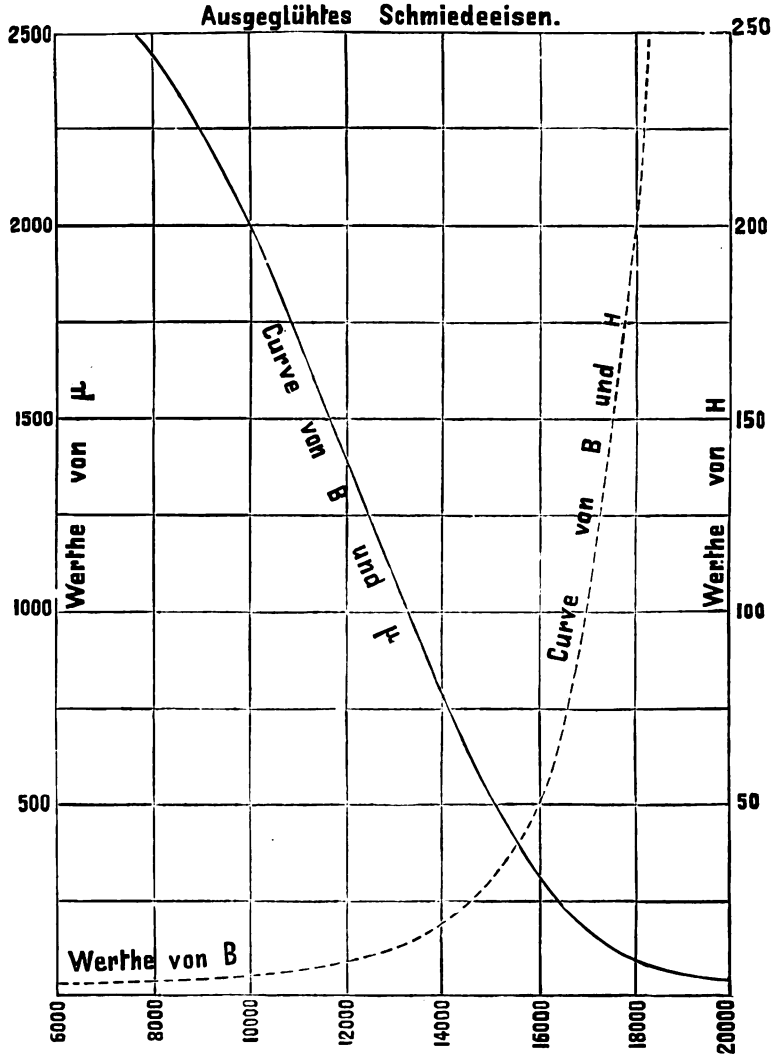


Fig. 39.

Es ist noch zu bemerken, dass man doppelte Magnetisirungscurven H und B erhält und zwar eine Curve für zunehmende Magnetisirungen, eine zweite für abnehmende Magnetisirungen; die letztere Curve liegt etwas oberhalb der erstern. Dieser Um-

Digitized by Google

stand ist für den Entwurf von Elektromagneten von einiger Bedeutung. Eisen und besonders harte Eisensorten, sowie Stahl zeigen, wenn sie einer starken magnetisirenden Kraft unterworfen waren und danach einer geringeren Kraft unterworfen werden, in höherem Grade einen Rückstand der Magnetisirung, als wenn zuerst eine geringere magnetisirende Kraft angewendet wird.

Jede Eisensorte, die stark zurückhaltende Eigenschaften zeigt, oder bei der die absteigende Curve wesentlich von der aufsteigenden sich unterscheidet, ist zur Herstellung von Elektromagneten ungeeignet, weil es von Bedeutung ist, dass der in den Kernen zurückbleibende Magnetismus so gering als möglich ist. Die Curven für Gusseisen zeigen die zurückbleibende Wirkung stärker als die Curven für Schmiedeeisen. Die Angaben in der Tafel sind übrigens Durchschnittswerthe aus den zunehmenden und abnehmenden Werthen bei der Magnetisirung.

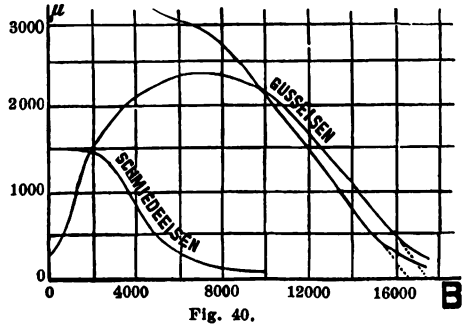


Fig. 40.

Sehr viel Belehrung bietet die Herstellung von Curven, in denen die Werthe von μ und B dargestellt sind

Zwei Curven beziehen sich auf die Angaben von Hopkinson für Guss- und Schmiedeeisen nach der Tafel Seite 68, die dritte giebt die Untersuchungen von Bidwell (Tafel Seite 71) wieder. Es möge bemerkt werden, dass bei der Probe aus geglühtem Eisen von Hopkinson die Mittelwerthe von μ zwischen den Punkten, an denen $B = 7000$ und $B = 16000$ ist, fast eine gerade Linie bilden und näherungsweise aus dem Werth

$$(17000 - B) : 3{,}5$$

berechnet werden können.

Die auf Tafel Seite 68 enthaltenen Angaben erscheinen in der Figur 39 in grösserem Maasstabe, um die Berechnung der Werthe von μ und H aus einem gegebenem Werth von B zu erleichtern.

Swinburne hat neuerdings zur Erleichterung der Beobachtungen an neuen Eisensorten eine Untersuchungsmethode angegeben, welche die Benutzung eines Galvanometers mit grosser Schwingungsdauer entbehrlich macht. Es wird in dieser Beziehung

Digitized by Google

auf seine Abhandlung in „The Electrician, Bd. XXV, S. 648, Oktober 1890 verwiesen.

4. Methoden auf Grundlage der Anziehung.

Eine andere Gruppe von Methoden zur Messung der Durchlässigkeit gründet sich auf das Gesetz der magnetischen Anziehung.

Auch von diesen Methoden sind mehrere Arten vorhanden.

D. Methode mit getheiltem Ringe.

Shelford Bidwell lieh mir freundlichst einen zu dieser Methode bestimmten Apparat. Er besteht aus einem Ringe von sehr weichem Holzkohleneisen von 6,4 *mm* Stabdicke und 8 *cm* äusserem Durchmesser. Der Ring ist in zwei gleiche Theile zerlegt, jede Hälfte ist mit einer erregenden Wickelung aus isolirtem Kupferdraht versehen und besitzt im Ganzen 1929 Windungen. Die beiden Halbringe passen genau aufeinander, zusammengepasst bilden beide Theile praktisch einen zusammenhängenden Ring. Durchfliesst ein Strom die Wickelungen, so werden die Halbringe magnetisirt und ziehen sich an; die zum Auseinanderreisen erforderliche Kraft wird nun gemessen.

Nach dem später zu behandelnden Gesetz der Tragkraft, ist die Zugkraft für eine bestimmte Berührungsfläche porportional dem Quadrat der Anzahl magnetischer Linien, die von einer Fläche zur andern über die Berührungsstelle hinweg treten. Die Kraft kann daher zur Bestimmung von B benutzt werden; wenn man H wie vorhin berechnet, kann die Durchlässigkeit bestimmt werden. Die folgende Tafel liefert eine Uebersicht über die von Bidwell gewonnenen Ergebnisse.

Weiches Holzkohleneisen.

B	μ	H
7390	1899,1	3,9
11550	1121,4	10,3
15460	386,4	40,0
17330	150,7	115,0
18470	88,8	208,0
19330	45,3	427,0
19820	33,9	585,0

Digitized by Google

E. Methode mit getheiltem Stabe.

Diese Methode wurde ebenfalls von Bidwell angewendet. Ein an beiden Enden gekrümmter Eisenstab wurde in der Mitte durchschnitten und in eine senkrechte Magnetisirungsspule gesteckt. Das obere gekrümmte Ende wurde in eine feste Oese eingehängt, das untere Ende trug eine Wageschale. Aus einer Batterie wurden nun Ströme von allmälig ansteigender Stärke durch die Wickelung entsendet und das grösste Gewicht bemerkt, mit dem man in jedem einzelnen Falle die Schale belasten konnte, ohne die Stäbe auseinanderzureissen.

F. Methode mit dem Durchlässigkeitsmesser.

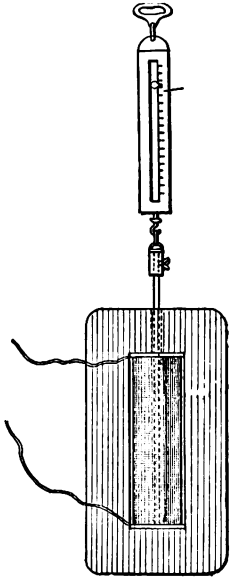


Fig. 41.

Diese Methode hat der Verfasser selbst zur Prüfung der verschiedenen Eisensorten angegeben. Sie ist eine Methode für die Werkstatt und unterscheidet sich dadurch von einer Methode für das Laboratorium. Ein Galvanometer ist dazu nicht nothwendig, man braucht das Eisen auch nicht in die Form eines Ringes zu bringen oder mit einer Wickelung zu versehen. Nur ein einfacher Apparat ist nothwendig, den man zweckentsprechend als Durchlässigkeitsmesser bezeichnen darf. Im Aeusseren besitzt der Apparat eine gewisse Aehnlichkeit mit dem Apparat von Hopkinson; er besteht aus einem rechtwinkeligen Stück weichen Schmiedeeisens, das mit einer Höhlung zur Aufnahme einer Magnetisirungsspule versehen ist; die Axe wird durch eine Messingröhre gebildet. Das Eisenstück ist 30 *cm* lang, 16,5 *cm* breit und 7,5 *cm* stark. An dem einen Ende besitzt der Block eine Bohrung, um das zu prüfende Eisen einzuführen. (Fig. 41).

Zu der Probe nimmt man einen dünnen Stab von etwa 0,3 *m* Länge, die Oberfläche des einen Endes muss sorgsam abgeflacht werden. Sobald die Probe in die Magnetisirungsspule gebracht ist und der erregende Strom sie durchfliesst, haftet der Stab mit seinem unteren Ende fest an der Fläche des Eisenblockes;

Digitized by Google

die zum Abreissen erforderliche Kraft (oder vielmehr die Quadratwurzel aus der Grösse der Kraft) bildet einen Masstab für den Durchgang der magnetischen Linien durch die Endfläche. Bei dem ersten von mir hergestellten Durchlässigkeitsmesser hatte die magnetisirende Wickelung eine Länge von 13,64 *cm* und besass 371 Drahtwindungen. Betrug die Stärke des erregenden Stromes ein Ampère, so wurde eine magnetisirende Kraft H = 34 hervorgebracht. Der Draht besitzt genügende Stärke, um 30 Ampère zu leiten, sodass man leicht eine magnetisirende Kraft von 1000 erreichen kann.

Der zu prüfende Stab wird an einer Federwage befestigt und damit die Kraft gemessen, die Wage ist mit einer selbstthätig wirkenden Fangvorrichtung versehen, sodass der Zeiger bei der höchsten Ablesung stehen bleibt.

Grenzen der Magnetisirung und der Durchlässigkeit.

Man bemerkt, dass sämmtliche Magnetisirungscurven dieselbe allgemeine Gestaltung besitzen; sie suchen ein Maximum zu erreichen, das indessen bei verschiedenen Materialien verschieden ist. Joule war der Ansicht, dass keine Stromstärke im Stande sei, eine Zugkraft von 14 *kg* auf 1 *qcm* hervorzubringen, die grösste von ihm erreichte betrug 12,3 *kg* für 1 *qcm*. Rowland war der Meinung, dass 12,44 *kg* für 1 *qcm* bei gewöhnlichem guten Eisen die Grenze sei, wenn auch eine unendlich grosse magnetisirende Kraft angewendet würde. Dies würde einem Grenzwerth von etwa 17500 Linien für das *qcm* entsprechen, jedoch ist dieser Werth häufig überschritten worden. Bidwell erhielt 19820 oder möglicherweise etwas mehr. Hopkinson gibt 18250 für Schmiedeeisen und 19840 für weichen Whitworth-Stahl an. Nach Kapp beträgt der Werth für Schmiedeeisen 16740, für Holzkohleneisen als Blech 20460, als Draht 23250. Bosanquet ermittelte den höchsten Werth in dem Mittelstück eines langen Stabes bei einer Probe zu 21428, bei einer zweiten zu 29388, bei einer dritten zu 27688. Ewing, der mit besonders grossen magnetisirenden Kräften arbeitete, brachte den Werth von B in Lowmoor-Eisen auf 31560 (während μ bis auf 3 sank) und später bis auf 45350. Die letztere Grösse entspricht der Grösse einer Zugkraft, die mehr als 70 *kg* für das *qcm* beträgt.

Die folgende Tafel liefert einige Ergebnisse der Untersuchungen von Ewing an schwedischem Eisem in sehr starken magnetischen Feldern.

Digitized by Google

H	B	μ
1490	22650	15,20
3600	24650	6,85
6070	27130	4,47
8600	30270	3,52
18310	38960	2,13
19450	40820	2,10
19880	41140	2,07

Gusseisen liefert weit geringere Werthe. Hopkinson fand mit einer magnetisirenden Kraft von 240 als Werth von B für graues Gusseisen 10783, für schmiedbares Gusseisen 12408 und für geflecktes Gusseisen 10546. Ewing brachte mit einer fünfzigfachen magnetisirenden Kraft den Werth von B bei Gusseisen auf 31760. Mitis Metall, eine Art von gegossenem Schmiedeeisen oder Schmiedeeisen, dass durch Zusatz von wenigen Prozenten, Aluminium flüssig gemacht wird, ist nach meinen Untersuchungen magnetisirungsfähiger als Gusseisen und dem Schmiedeeisen nicht weit nachstehend. Die Mischung würde ein ausgezeichnetes Material für Kerne von Elektromagneten in vielen Fällen bilden, in denen es auf billige Herstellung ankommt. Früher nahm man an, dass für B z. B. bei Schmiedeeisen ein Grenzwerth von ungefähr 20000 bestehe. Die von Ewing gewonnenen Ergebnisse, die mit ausserordentlich hohen magnetisirenden Kräften erlangt wurden, beweisen, dass die Voraussetzung nicht zutrifft, andererseits geht aber daraus hervor, dass B—H einer Grenze zuneigen. Derjenige Theil von B, der unmittelbar dem Vorhandensein des Eisens zuzuschreiben ist, neigt zu einer bestimmten Sättigungsgrenze. Dieses Maximum scheint für Schmiedeeisen bei ungefähr 21360, für Gusseisen bei 15580 zu liegen.

Wirkung eines Luftzwischenraumes im magnetischen Kreise.

Sämmtliche in dem Vorhergehenden erörterten Ergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf Vorgänge im Eisen selbst, die Curven der Magnetisirung besitzen lediglich für die magnetischen Materialien Gültigkeit. Die Curven zeigen (in Werthen von H) die magnetische Kraft, die erforderlich ist, um eine Anzahl B

Digitized by Google

magnetischer Linien durch einen *ccm* des Materiales zu treiben. Haben wir uns mit einem Eisenstück zu beschäftigen, das mehr als ein *qcm* Querschnitt und mehr als ein *cm* Länge besitzt, so ist zur Darstellung der Verhältnisse (insoweit nur die innere Magnetisiruug des Eisens in Frage kommt) die Aenderung der Scala für die Curven erforderlich. Nehmen wir etwa einen eisernen aus einem quadratischen Stabe von Schmiedeeisen bestehenden Ring (von der Probe Hopkinsons); die Seitenlänge betrage 2 *cm* und die mittlere Ringlänge 80 *cm*; wir müssen dann die gesammte Strömung N der magnetischen Linien im Eisen, und das Linienintegral Hl der magnetisirenden Kraft um die Länge des Eisenkreises herumgemessen, auftragen.

Nimmt man die Curve von B und H in der Fig. 39, so ist die Scala in folgender Weise zu ändern: da die Fläche 4 *qcm* beträgt, so wird N bei jedem Stande der Magnetisirung gleich dem vierfachen Werth von B in dem betreffenden Zustand sein. Deshalb ist der für die horizontale Scala mit $B = 16000$ bezeichnete Punkt nunmehr $N = 64000$. Da ferner die Länge l des Stabes 80 *cm* beträgt, so ist der Punkt, der auf der senkrechten Scala auf der rechten Seite $H = 50$ entspricht und den Werth der magnetischen Kraft bedeutet, nunmehr als $Hl = 4000$ zu berechnen. Mit diesen Abänderungen der Scalen kann die Curve zur Darstellung des magnetischen Verhaltens des ganzen Ringes dienen; es lässt sich ersehen, welches Integral der magnetisirenden Kraft mit Hülfe des Stromes in der Wickelung erforderlich ist, um die gesammte Strömung N der magnetischen Linien bis zu irgend einem gewünschten Betrage zu bringen. Kennt mgn Hl, so ist die Berechnung der erforderlichen Ampère-Windungen leicht auszuführen, weil die Ampère-Windungen mal 1,257 gleich dem Linienintegral der magnetisirenden Kraft sind.

Ist indessen im magnetischen Kreise ein Luftzwischenraum vorhanden, oder ein Zwischenraum, der mit unmagnetischem Material ausgefüllt ist, so wird einleuchten, dass unter Annahme einer der Luft gleichen Durchlässigkeit (= 1) für diese Gegenstände, die Nothwendigkeit vorliegt, den Betrag der magnetisirenden Kraft zu erhöhen, um dieselbe Anzahl magnetischer Linien durch eine Zwischenlage von geringerer Durchlässigkeit zu treiben.

Diese Thatsache wird in der Fig. 42 erläutert, in der die Curve *OcC* die Beziehung zwischen der Anzahl magnetischer Linien

Digitized by Google

in einem Eisenstabe und der Anzahl erregender Ampère-Windungen ($Hl : 1{,}257$) zeigt, die nothwendig sind, um die Anzahl magnetischer Linien durch das Eisen zu treiben.

Soll z. B. der Werth C erreicht werden, so muss die Erregung den Werth Ox_1 besitzen. Die Linie ObB bezeichnet in dem Diagramm die Beziehung zwischen der Strömung der magnetischen Linien durch den Luftzwischenraum und den Ampère-Windungen, die zur Hervorbringung dieser Strömung nothwendig sind. Besässe der Zwischenraum 2 *qcm* Querschnitt und 1 *cm* Länge, so würden 0,795 Ampère-Windungen das Feld $H = B = 1$ hervorbringen. Im vorliegenden Falle ist der Zwischenraum mit grösserem Flächeninhalt und kürzer als 1 *cm* vorausgesetzt; die Linie OB ist so geneigt, dass die Länge Ox_2 die zur Erreichung der magnetischen Strömung bis b nothwendigen Ampère-Windungen darstellt, dieser Punkt liegt in der selben Höhe wie c. Es ist nun leicht, beide Ergebnisse zu vereinigen, denn der gesammte Betrag der Erregung, die nothwendig ist, um die magnetischen Linien durch Luft und Eisen zu treiben, wird durch die Summe der einzelnen Beträge gebildet.

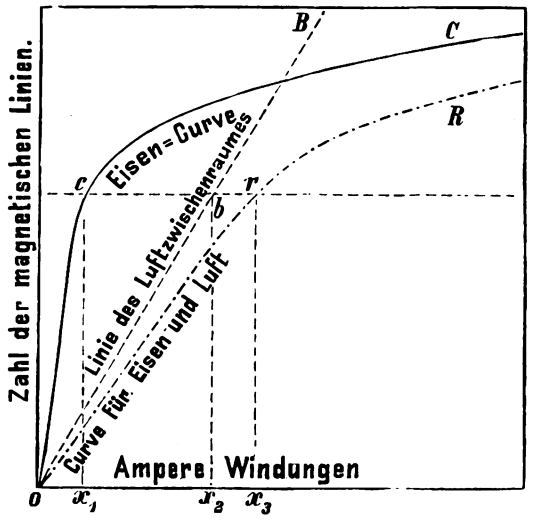


Fig. 21.

Der Punkt x_2 ist so gewählt, dass Ox_3 gleich der Summe von Ox_1 und Ox_2 ist, oder dass die Entfernung des Punktes r von der senkrechten Axe gleich der Summe der betreffenden Entfernungen von c und b ist. Wiederholt man dies für eine grosse Zahl entsprechender Punkte, so lässt sich die resultirende Curve OrR aus den beiden besondern Curven herstellen. Man sieht daraus im Allgemeinen, dass ein Zwischenraum im magnetischen Kreise die Wirkung besitzt, die Curve herabzudrücken, die Anfangssteigung wird durch den Luftzwischenraum bestimmt.

Digitized by Google

Wirkung von geraden Kernen verschiedener Länge.

Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, dass, wenn ein kurzer Eisenkern in eine Magnetisirungsspule gelegt wird, der einzige Rückweg für die magnetischen Linien durch die Luft

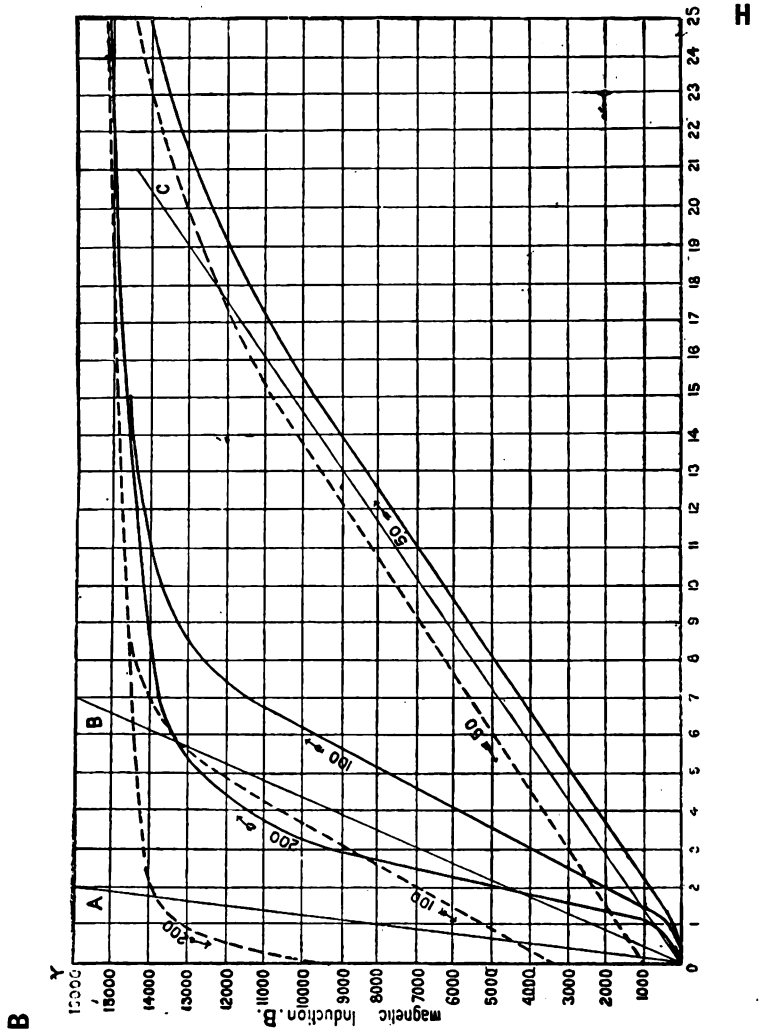


Fig. 43.

gebildet wird; aus diesem Grunde muss eine grössere äussere magnetisirende Kraft angewendet werden, um das Eisenstück in einem gleich hohen Grade zu magnetisiren, als bei einem langen Stücke oder einem Ringe bei Anwendung derselben Spule. Die Fig. 43,

Digitized by Google

welche den Untersuchungen Ewing's entstammt, bezieht sich auf ausgelühten Draht aus weichem Eisen; die Länge war zuerst gleich dem 200fachen Durchmesser und wurde nachher auf das 100fache und dann auf das 50fache des Durchmessers verringert. Die voll ausgezogenen Curven zeigen die Beobachtungen bei wachsenden magnetisirenden Kräften, die Curven mit punktirten Linien zeigen die Beobachtungen bei abnehmenden (bis Null) magnetisirenden Kräften.

Die drei Linien OA, OB und OC ergeben denjenigen Theil der magnetischen Kraft, die nothwendig war, um die magnetischen Linien durch die Luft zu treiben.

Man nehme z. B. den Fall, in dem der Draht die 50fache Länge des Durchmessers besass. Um B auf 9000 zu bringen, musste $H = 14$ sein. Von dieser Kraft waren aber 13 Theile erforderlich, um die Linien durch den Luftzwischenraum zurück zu treiben, wie man daraus ersieht, dass die Linie OC bei dem Punkte, wo $B = 9000$ ist, der Grösse $H = 13$ entspricht; demnach war nur $H = 1$ erforderlich, um in dem Draht $B = 9000$ zu machen.

Wirkung von Verbindungsstellen.

Nachdem wir die zusätzliche magnetisirende Kraft berechnen können, die nothwendig ist, um die magnetischen Linien durch einen Luftzwischenraum zu treiben, lässt sich eine bisher vernachlässigte Grösse erörtern, nämlich die Wirkung von Verbindungsstellen im Eisen, die einen Widerstand im magnetischen Kreise bedingen. Hufeisenförmige Elektromagnete werden nicht immer aus einem gebogenen Eisenstück angefertigt, sondern (vergl. Fig. 23) aus zwei geraden Kernen hergestellt, die in ein Joch eingeschraubt oder eingelassen sind.

Es ist eine Aufgabe nur für den Versuch, den Widerstand einer Schnittfläche im Eisen gegen die Strömung der magnetischen Linien zu bestimmen. Wenn Anker sich mit den Kernen in Berührung befinden, so besteht niemals eine vollkommene Berührung; andernfalls würden Kerne und Anker auch ohne Anwendung irgend einer magnetisirenden Kraft aneinander haften; es findet nur eine unvollkommene Berührung statt und die Verbindungsstelle besitzt einen beträchtlichen magnetischen Widerstand. Dieser Umstand wurde von Professor J. J. Thomson und von Newall 1887 (in

Digitized by Google

den Cambridge Philosophical Society's Proceedings) geprüft, neuerdings noch eingehender von Professor Ewing (Philosophical Magazine für September, 1888). Ewing versuchte nicht nur die Wirkung von Schnittflächen, die möglichst eben gemacht waren, sondern benutzte auch verschiedene magnetisirende Kräfte, und untersuchte die Verbindungsstellen bei verschiedenem Druck.

Die folgende Tafel gibt die von Ewing ermittelten Werthe an, wenn der Stab aus Schmiedeeisen zuerst quer in zwei, dann in vier, und schliesslich in acht Stücke zerschnitten wurde. Die Durchlässigkeit des Stabes nahm bei jedem Schnitte ab.

H	B				Mittlere Stärke des gleichwerthigen Luftraumes für einen Schnitt.	Stärke des Eisens von gleichwertigem Widerstand für einen Schnitt.
	Ganzer Stab.	Zwei Theile.	Vier Theile.	Acht Theile.	*cm.*	*cm.*
7,5	8500	6900	4809	2600	0,0036	4
15,0	13400	11550	8900	5550	0,0030	2,53
30,0	15350	14550	12940	9800	0,0020	1,10
50,0	16400	15950	15000	13300	0,0013	0,43
70,0	17100	16840	16120	15200	0,0009	0,22

Angenommen, wir arbeiten bei einer Magnetisirung des Eisens von etwa 16000 Linien auf das *qcm*, wozu eine magnetisirende Kraft von $H = 50$ erforderlich ist, wir ersehen dann aus der Tafel, dass jede Verbindungsstelle im Eisen ebensoviel Widerstand darbietet, als 0,0013 *cm* Luftzwischenraum oder als wenn eine Lage Eisen von 0,43 *cm* Länge hinzugefügt worden wäre. Bei schwachen magnetisirenden Kräften bedeutet die Wirkung eines Schnittes durch das Eisen bei guten Schnittflächen dasselbe, als wenn eine Luftlage von etwa 0,003 *cm* oder eine Eisenlänge von 2,5 *cm* hinzugefügt worden wäre.

Digitized by Google

Bei erheblichen magnetisirenden Kräften nimmt dies ab, wahrscheinlich wegen der Anziehung der beiden Schnittflächen. Der Zug im magnetischen Kreise, der bei hohen magnetischen Kräften auf 15000—20000 Linien für das *qcm* steigt, wirkt schon als ein Druck von 9—16 *kg* auf das *qcm*; hierdurch werden die Widerstände bedeutend vermindert, sie gehen thatsächlich bis auf etwa $^1/_{20}$ ihres Anfangswerthes herunter. Wendete Ewing besondere Zusammenpressung an, die mehr als 225 *kg* für das *qcm* betrug, und die an sich die Magnetisirungsfähigkeit des Eisens vermindert haben würde, so fand er, dass die Verminderung nahezu durch die bessere Leitungsfähigkeit der Schnittflächen ausgeglichen wurde. Die frühere Fläche, wenn sie auf solche Weise zusammengedrückt wird, schliesst sich, als ob sie magnetisch wäre und wirkt überhaupt nicht wie ein Schnitt, gleichzeitig entsteht aber ebensoviel Verlust als Gewinn, denn das Eisen selbst wird weniger magnetisirungsfähig.

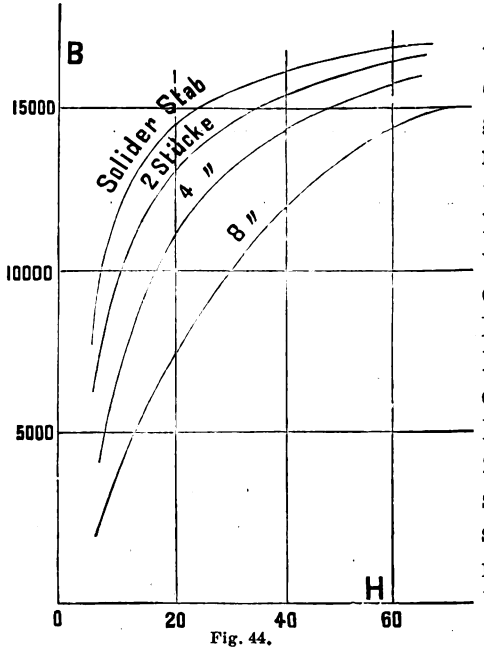


Fig. 44.

Die von Ewing erzielten Ergebnisse werden durch die Curven in der Fig. 44 dargestellt. Waren die Schnittflächen genau abgeglichen, so wurde die schädliche Wirkung des Schnittes bedeutend vermindert und unter Anwendung eines äusseren starken Druckes fast ausgeglichen. Die Wirkung des Druckes war erheblich. Wenn der auf den Eisenstab ausgeübte Druck 226 *kg* auf das *qcm* betrug, so zeigte die Verbindungsstelle unter Anwendung magnetisirender Kräfte einen Widerstand, der mit dem Zuwachs an magnetisirender Kraft abnahm. Die nachstehende Tafel ergibt die Werthe von *H* und *B* bei dem soliden und dem zerschnittenen Stabe, in gleichzeitiger Beziehung mit der mittleren Stärke des gleichwerthigen Luftzwischenraumes.

Digitized by Google

Wirkung des Druckes auf Verbindungsstellen.

H	B (bei einem Druck von 226 *kg* auf das *qcm*.		Mittlere Stärke des gleichwerthigen Luftzwischenraumes in *mm*.
	Solider Stab.	In 8 Stücke zerschnittener Stab.	
7,5	7500	3600	0,020
10,0	10000	4900	0,019
20,0	13900	8300	0,018
30,0	15200	10700	0,017
50,0	16500	13750	0,011
70,0	17200	15700	0,007

Bei verschiedenen Belastungen verursachte das Anwachsen des Druckes in einem schwachen magnetischen Felde, eine Ausgleichung der Wirkungen bei gut gearbeiten Flächen, wie die nachstehende Tafel zeigt:

Druck in *kg* auf das *qcm*.	B (wenn H = 5)		Gleichwerthiger Luftzwischenraum in *mm*.
	Vor dem Durchschneiden.	Nach dem Durchschneiden.	
0	5600	4700	0,022
56,5	5400	4670	0,020
131,0	4700	4200	0,017
169,5	4050	3800	0,010
226,0	3650	3650	0

Wirkungen der Spannung.

Wenn ein Eisenstück unter dem Einfluss einer Spannung sich befindet, so werden die magnetischen Eigenschaften etwas verändert. Wird eine Zugspannung in der Längenausdehnung ausgeübt, während das Eisen magnetisirt wird, so findet man zunächst ein Anwachsen der Durchlässigkeit, während eine Druckspannung in der Längenausdehnung die Durchlässigkeit vermindert. Dies wird aus der vorstehenden Tafel ersichtlich, da hiernach ein Druck von 226 *kg* auf das *qcm* den Werth B in einem Stabe aus Schmiedeeisen von 5600 auf 3650 bringt oder die Durchlässigkeit von 1120 auf 730 herabsetzt. Spannung beeinträchtigt auch

Digitized by Google

die Weichheit des Eisens. Ein Stück ausgeglühten Eisendrahtes der durch Ziehen gehärtet wurde, verhält sich ähnlich wie ein Stück Stahl, wie man aus den Ewing'schen Curven, Fig. 35 Seite 62 ersehen kann. Zug mit Drehung verbunden beeinflusst gleichfalls die magnetische Eigenschaft.

Wesentlich ist überhaupt, dass jede derartige Behandlung, wie Hämmern, Walzen, Drehen und Aehnliches die magnetische Eigenschaft von ausgeglühtem weichem Eisen schädlich beeinflusst. Stücke von weichem ausgeglühten Eisen, die niemals von einem Werkzeug berührt wurden, zeigen, falls sie nicht wirklich geschlossene magnetische Kreise bilden, kaum eine Spur von zurückbleibendem Magnetismus, sogar nicht nach der Anwendung magnetischer Kräfte. Der Gebrauch der Feile verändert dies plötzlich. Sturgeon wies auf die grosse Bedeutung dieses Umstandes hin.

In den Bedingungen für Lieferer von Apparaten für die englische Post- und Telegraphen-Verwaltung wird dem Hersteller auferlegt, dass die Kerne nach dem Ausglühen nicht gefeilt werden dürfen. Das fortgesetzte Hämmern eines Ankers gegen die Pole eines Elektromagnetes kann mit der Zeit eine ähnliche Wirkung hervorbringen.

Wirkung der Schwingung.

Die Wirkungen der Schwingung auf den Magnetismus vermindern alle zurückbleibenden Thätigkeiten und bewirken, dass ein Versuchsstück schneller den mittleren Zustand erlangt, der der augenblicklichen magnetischen Kraft entspricht. Wird ein Versuchsstück aus weichem Eisen bei schneller Schwingung untersucht, so findet man kaum einen Unterschied zwischen den aufsteigenden und absteigenden Curven der Magnetisirung. Ein einziger Schlag auf einen Draht aus weichem Eisen zerstört plötzlich den in ihm befindlichen zurückgebliebenen Magnetismus.

Wirkungen der Erwärmung

Wird Eisen erwärmt, so unterliegen seine magnetischen Eigenschaften einzelnen Aenderungen. Das Ansteigen der Temperatur bringt bei verschiedenen Zuständen der Magnetisirung verschiedene Wirkungen hervor und die Wirkungen sind bei verschiedenen Materialien wieder verschieden. Eine Temperaturerhöhung bewirkt bei weichem Eisen in schwachen magnetischen Feldern ein Anwachsen der Durchlässigkeit, die zunimmt, bis das

Digitized by Google

Probestück sich in Rothglühhitze bei etwa 760° C. befindet, da dann der bedeutende Werth von 10000 erreicht wird. Darüber hinaus findet eine Abnahme statt; sobald die Temperatur von ungefähr 780° C. erreicht worden ist, hört das Eisen auf magnetisch zu sein. Bei dieser und bei allen höheren Temperaturen unterscheidet sich das Eisen in magnetischer Beziehung nicht merklich von der Luft oder dem luftleeren Raum.

Bringt man Eisen in ein sehr starkes magnetisches Feld, so bewirkt die Steigerung der Temperatur eine Verminderung der Durchlässigkeit, zunächst langsam, dann schneller, bis die Temperatur von 780° C. erreicht worden ist, wonach der gesammte Magnetismus verschwindet. Beim Stahl ist die Wirkung eigenthümlicherweise verschieden. Sowohl bei weichen als harten Stahl-

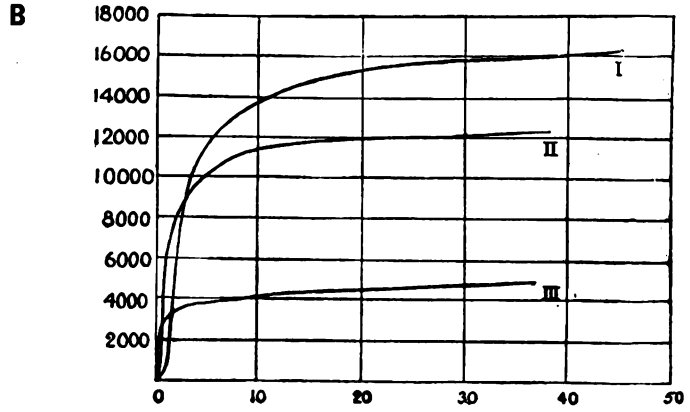


Fig. 45.

sorten bewirkt das Ansteigen der Temperatur in einem sehr schwachen magnetischen Felde (in dem $H =$ etwa 0,2) eine Zunahme der Durchlässigkeit, bis die Erwärmung auf 700° C. gestiegen ist; dann fällt die Durchlässigkeit plötzlich auf Null.

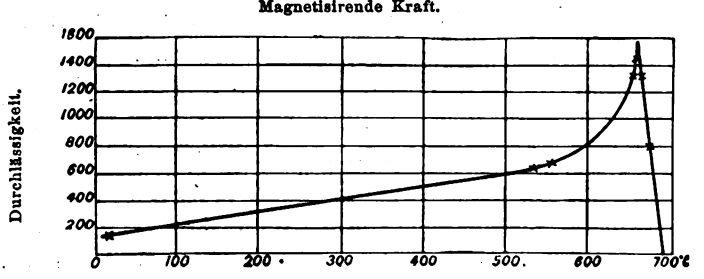
In einem Felde, in dem $H =$ etwa 2 ist, wird die Magnetisirung bei niedrigen Temperaturen grösser und der endliche Abfall beginnt bei einer merklich unterhalb 700° C. eintretenden Temperatur. In einem kräftigen Felde ($H = 40$) fällt die Durchlässigkeit stetig mit Zunahme der Temperatur. Bei hohen Temperaturen sind auch alle zurückbleibenden Wirkungen geringer.

Die Fig. 45 macht die Wirkungen der Temperatur in Bezug auf die Aenderung der magnetischen Curve des Stahles ersichtlich;

Digitized by Google

die drei Curven beziehen sich auf die Temperaturen von 12°, 620° und 715° C.

Die aus den Untersuchungen von Hopkinson entnommene Fig. 46 zeigt, wie bei schwacher magnetisirender Kraft in hartem Stahl die Magnetisirung mit Zunahme der Temperatur steigt, bis



Temperatur.
Fig. 46.

ein bestimmter Punkt erreicht worden ist. Von diesem Punkte ab fällt der Magnetismus plötzlich ab und verschwindet bei der kritischen Temperatur plötzlich.

Zurückbleibender Magnetismus.

Es ist eine wohlbekannte Thatsache, dass verschiedene magnetische Materialien — Magnetstein, Stahl, besonders gehärteter Stahl und Sorten harten Eisens — zurückbleibenden Magnetismus zeigen, wenn sie magnetisirenden Kräften unterworfen worden sind. Ebenso ist bekannt, dass geschlossene Kreise weichen Eisens — sogar des weichsten — einen bedeutenden Betrag von zurückbleibendem Magnetismus erkennen lassen, so lange der Kreis nicht unterbrochen wird. Ein sehr einfacher Beweis dieser Thatsache wird durch jeden Elektromagnet erbracht, dessen Kern und gut passender Anker einen geschlossenen magnetischen Kreis bilden. Wird der Elektromagnet durch einen Strom erregt und dieser unterbrochen, so fällt der Anker gewöhnlich nicht ab, sondern es kann sogar ziemliche Kraft zum Abreissen erforderlich werden; ist der Anker aber einmal abgerissen, so haftet er nicht mehr, die zurückbleibende Magnetisirung wird nicht dauernd.

In ähnlicher Weise kann ein Hufeisen aus Stahl, wenn er kräftig magnetisirt wird, während sein Anker die Pole verbindet, übersättigt werden, d. h. es kann zu einem höheren Grade der Magnetisirung gebracht werden, als dem, den es dauernd zu halten vermag; ein Theil dieses zurückgebliebenen Magnetismus verschwindet, sobald der Anker entfernt wird. Diese nach-

Digitized by Google

träglich auftretenden Erscheinungen gehören in den weiten Bereich der magnetischen Nachwirkungen. Sind magnetische Kräfte stark genug, so üben sie auf die Moleküle eines magnetisirbaren Körpers Wirkungen aus, die noch nach Aufhören der Ursache fortbestehen. Aendern sich die Ursachen in ununterbrochener Weise, so ändern sich die Wirkungen in gleicher Weise, erfahren aber eine Phasenverschiebung; die Ursache bleibt hinter der Wirkung zurück. Man darf dies nicht mit einer behaupteten zeitlichen Verzögerung des Magnetismus verwechseln, der Manches zugeschrieben ist, das ganz andern Ursachen entstammt. Die erörterten Betrachtungen beziehen sich eher auf Verschiebungen der Phase als auf Zeitverzögerungen und greifen keinem Gegenstand vor, sei es, dass die Thätigkeiten sich schnell oder langsam folgen.

Bei allmählig von Null bis zu einem hohen Werth anwachsender magnetisirender Kraft H steigt die resultirende innere Magnetisirung B zuerst bis zu einem Maximum an, nimmt dann bei allmählig abnehmender Magnetisirung ab, fällt aber nicht bis auf Null. Die vom Maximum absteigende Curve fällt nicht mit der ansteigenden Curve des Magnetismus zusammen. Wenn thatsächlich die magnetisirende Kraft gänzlich aufgehört hat, so bleibt bei einem Probestück eine Magnetisirung von etwa 7300 Linien auf das *qcm* zurück. Man kann der Anzahl der Linien für das *qcm*, die so als Restwerth von B zurückbleiben, die Bezeichnung Rückstand beilegen. Zur Vernichtung des Rückstandes muss eine entgegengesetzt wirkende magnetische Kraft angewendet werden.

Unter der Annahme, dass eine genügend starke magnetisirende Kraft angewendet worden ist, fällt die Curve abwärts und schneidet die horizontale Axe in einem von Anfangspunkte links liegenden Punkte; bei stärkeren entgegengesetzt magnetisirenden Kräften beginnt das Probestück mit magnetischen Linien erfüllt zu werden, die in umgekehrter Richtung verlaufen. Der besondere Werth der (negativen) entgegengesetzt magnetisirenden Kraft, die den magnetischen Rückstand wieder auf Null zu bringen vermag, ist von Hipkinson mit dem Namen „Coercivkraft“ belegt worden. Bei dem Probestück aus Schmiedeeisen betrug diese Kraft 2 (in *C. G. S.* Einheiten). Die Kraft, die demnach erforderlich wird, um irgend einer Eisenprobe ihren magnetischen Rückstand zu nehmen, lässt sich als ein Maas für die Neigung des untersuchten Eisens, Dauermagnetismus zurückzuhalten, ansehen. Harte Eisensorten sowie Stahl zeigen stärkere Coercivkraft als weiche Eisen-

Digitized by Google

sorten. Während weiches Schmiedeeisen den Werth 2 besitzt, zeigt harter Stahl etwa 50. Fernere Angaben über harte Stahlsorten finden sich im Kapitel XVI über Dauermagnete.

Hysteresis.

Ewing, der die bei verschiedenen Eisen- und Stahlsorten sich zeigenden Eigenschaften eingehend prüfte, bezeichnete mit Hysteresis die Neigung, dass die Wirkungen in ihrer Phase hinter den erzeugenden Ursachen zurückbleiben. Zum Studium der Hysteresis ist es zweckmässig, die zu untersuchende Probe einem vollständigen Kreislauf magnetisirender Kräfte (oder einer Anzahl aufeinanderfolgender Kreisläufe) zu unterziehen.

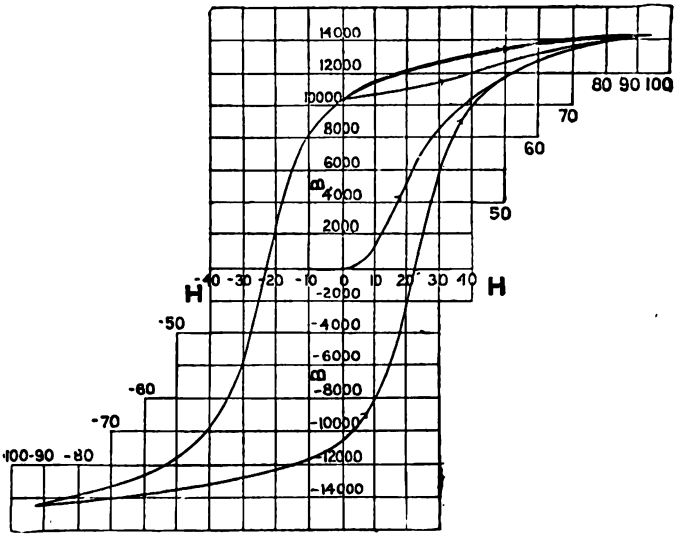


Fig. 47.

Wenn z. B. die magnetisirende Kraft bei Null beginnt und zu einem hohen Werth ansteigt (etwas bis $H = 200$), darauf wieder auf Null fällt, so muss man sie dann umkehren und bis auf einen eben so hohen negativen Werth wie früher steigern, schliesslich wieder auf Null abnehmen lassen. Die Fig. 47 zeigt einen solchen Kreislauf für Untersuchungen an ausgeglühtem Stahldraht (für Pianoforte), die von Ewing angestellt worden sind.

Die Curve beginnt im Mittelpunkt des Diagramms; sobald H wächst, steigt sie nach rechts konkav an und wendet sich dann. Sobald H den Werth 90 erreicht, steigt B auf 14000. Bringt man nun H auf Null, so fällt die Curve nicht, wie sie

Digitized by Google

vorhin anstieg, denn wenn H auf 20 gelangt, so ist B erst auf 12000 angekommen und wenn $H = 0$ ist, so findet man den Rückstand noch etwa = 10500. Wird von diesem Punkte ab H wieder auf 90 verstärkt, so gelangt B wieder auf 14000, wie man aus der schwach ausgezogenen Linie ersieht. Wird indessen die magnetisirende Kraft umgekehrt, so fällt die Curve links ab und schneidet die Abscisse bei — 24; dieser Werth entspricht also der Coercivkraft. Wächst die entgegengesetzte magnetisirende Kraft bis — 90, so steigt die entgegengesetzte Magnetisirung auf den Werth — 14000 oder noch etwas höher. Wird die entgegengesetzte Kraft bis auf Null gebracht, so kehrt die Curve nach rechts zurück, schneidet die Ordinate im Punkte $B = -10500$ (negativer Rückstand). Bei abermaliger Umkehrung findet man für den Werth $H = +24$ wiederum B gleich Null. Von diesem Punkte ab bewirkt die Verstärkung von H ein schnelles Ansteigen der Magnetisirung und zwar nicht in der früheren Weise, jedoch zunehmend bis zum Gipfel der Curve, sobald H auf denselben Werth 90 gebracht wird.

Kreisläufe der Magnetisirung.

Derartige Kreisläufe der Magnetisirung, wie sie vorhin beschrieben wurden, liefern für jedes Probestück aus Eisen oder Stahl stets ähnliche Curven, die eine Fläche einschliessen. Von Warburg[1]) und Ewing[2]) ist nachgewiesen worden, dass diese Thatsache eine besondere Bedeutung besitzt; denn die eingeschlossene Fläche liefert ein Mass für diejenige Arbeit, die verbraucht wird, während das Eisen den vollständigen Kreislauf der Magnetisirungen durchmacht. Ebenso wie die Fläche, die auf einem Indikator-Diagramm für eine Dampfmaschine sich bildet, ein Mass für die in nutzbare Arbeit umgesetzte Wärme während des Kreislaufes der von der Maschine vollzogenen Thätigkeiten bildet, so liefert bei dem magnetischen Kreislauf die von den Curven eingeschlossene Fläche ein Mass der in (nutzlose) Wärme umgesetzten Arbeit.

Um die Bedeutung einer Fläche in dem Diagramm, in dem die beiden dargestellten Grössen von der magnetisirenden Kraft

1) Wied. Ann. XIII, 1881, S. 141.

2) Proc. Royal Soc. XXXI, 1881, S. 22; XXXIV, 1884, S. 39; XXXV, 1885, S. 1. Phil. Trans., 1885, II, 523.

Digitized by Google

und der Magnetisirung gebildet werden, näher kennen zu lernen, müssen wir zunächst auf die Grundbedeutung des Indikator-Diagramms zurückgehen. In diesem Diagramm wird der Druck (die Ursache) senkrecht und die auf den Kolben wirkende Menge (Wirkung) horizontal aufgetragen. Besitzt der Druck den Durchschnittswerth p, und beträgt die Aenderung der Menge dv, so ist die Arbeit gleich dem Product dieser beiden Grössen, oder wenn die Arbeit mit dw bezeichnet wird, so ist $dw = p\,dv$. Die gesammte eingeschlossene Fläche, die von der Summe der Producte gebildet wird, stellt also die Summe der in einem Kreislauf geleisteten Arbeit dar, demnach ist

79

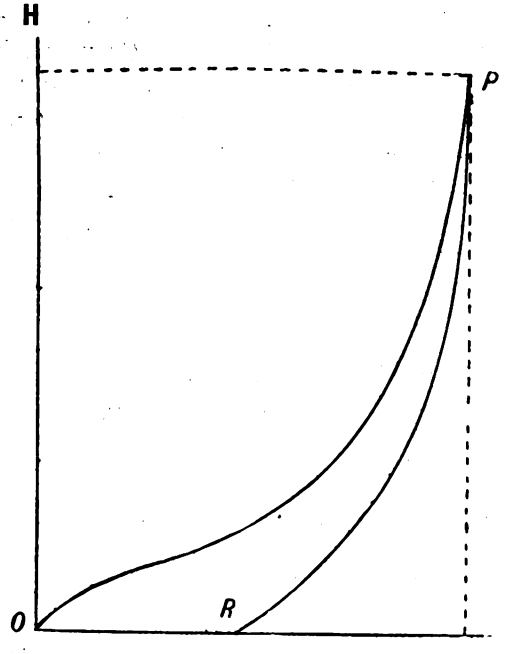


Fig. 48.

$$w = \int p\,dv$$

Ebenso sind für den magnetischen Kreislauf zwei Veränderliche vorhanden, die magnetisirende Kraft H (die Ursache) und die Magnetisirung B (die Wirkung). Besitzt die magnetisirende Kraft den Durchschnittswerth H und wächst dann die Magnetisirung um einen Betrag dB, so ist die Arbeit gleich dem Product der beiden Grössen; in einem Kreislauf ist die eingeschlossene Fläche (die Summe der unendlich kleinen Flächen, die den einzelnen Producten entsprechen) proportional der gesammten geleisteten Arbeit, d. h.

15500

$$w = \int H\,dB.$$

In der Fig. 48, die sich auf eine von Hopkinson geprüfte Eisenorte von ausgeglühtem Schmiedeeisen bezieht, sind die Werthe von H senkrecht und die von B horizontal aufgetragen, da diese Lage der Auftragung der Werth p und v in einem Indikator-Diagramm entspricht.

Digitized by Google

Die Curve, die von O ausgeht, stellt die Beobachtungen mit magnetisirenden Kräften dar, wenn H bis etwa 67 steigt, während die Anzahl der magnetischen Linien auf das *qcm* etwa 15500 beträgt. Die zweite Curve liefert das Ergebnis bei Abnahme (bis Null) der magnetisirenden Kraft, bei der sich eine zurückbleibende Magnetisirung R von nicht weniger als etwa 7300 Linien auf das Quadratcentimeter.

Wenden wir die Bedeutung des Indikator-Diagramms auf diese Curven an, so ergiebt sich, dass die Fläche unterhalb der ersten Curve bis zur Abcisse und begrenzt von der Ordinate des Punktes P (rechts) das Integral des Productes aus magnetisirender Kraft und Magnetisirung darstellt und also derjenigen geleisteten Arbeit (auf das *ccm* Eisen) proportional ist, die den durch den Punkt P im Diagramm bezeichneten magnetischen Zustand hervorgebracht hat. Ebenso stellt die Fläche unter der absteigenden Curve die Arbeit, dar, die bei der Entmagnetisirung des Probestückes bis zu dem durch Punkt R bezeichneten Zustande wiedergegeben wurde, bis die magnetisirende Kraft aufhörte. Die schmale eingeschlossene Fläche zwischen den Curven stellt die nicht zurückerlangte Arbeit dar; die Verausgabung dieser Arbeit zeigt sich durch den Rest an Magnetismus. Lässt man die magnetisirenden Kräfte einen vollständigen Kreislauf von $+H$ bis $-H$ erst in der einen und dann in der andern Richtung durchmachen, so durchläuft die resultirende Magnetisirung einen ähnlichen Kreis mit dem Ergebniss, dass eine schmale geschlossene Fläche zwischen den beiden Curven (Fig. 49) entsteht. Diese Fig. 49 bezieht sich auf eine Sorte Schmiedeeisen.

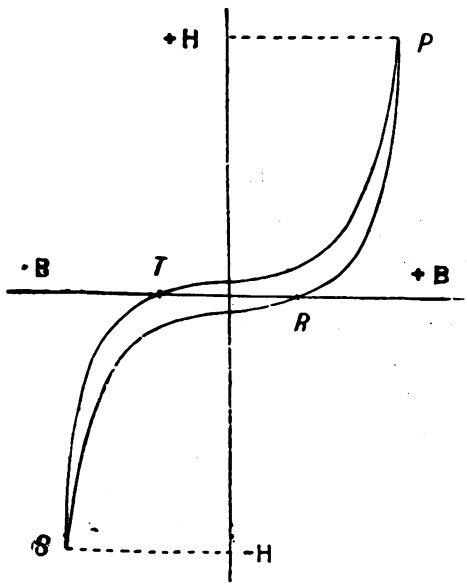


Fig. 49.

In der Fig. 50 ist zur Vergleichung eine Curve für Schmiedeeisen und eine solche für Stahl wiedergegeben. In allen diesen Fällen stellt die geschlossene Fläche die Arbeit dar, die

Digitized by Google

bei der Einwirkung der abwechselnden magnetisirenden Kräfte nutzlos aufgewendet worden ist. Bei weichem Eisen, bei dem die aufsteigende und absteigende Curve nahe zusammenliegen, ist die eingeschlossene Fläche klein, es wird thatsächlich sehr wenig Energie in einem Kreislauf magnetischer Arbeit verschwendet. Dagegen findet man bei hartem Eisen und besonders bei hartem Stahl einen grossen Raum zwischen den Curven und demzufolge einen erheblichen Verbrauch an Energie. Die Hysteresis kann als eine Art innerer oder molekularer magnetischer Reibung betrachtet werden, vermöge deren bei abwechselnden Magnetisirungen das Eisen heiss wird. Aus diesem Grunde ist das Verständniss der eigenthümlichen Wirkung von Bedeutung bei dem Bau solcher Elektromagnete, die zum Gebrauche bei schnellen Stromwechseln bestimmt sind. Aus den folgenden Angaben ersieht man die Zahl der Watts, die in gut geblättertem weichem Schmiedeeisen durch Hysteresis verbraucht werden

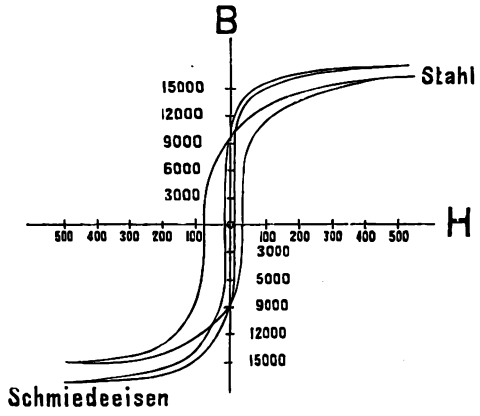


Fig. 50.

B	Verbrauchte Watt für das Cubikdecim. bei 10 Kreisläufen in der Secunde.	Verbrauchte Watt für das Cubikdecim. bei 100 Kreisläufen in der Secunde.
4000	1,43	14,3
5000	1,70	17,0
6000	2,67	26,7
7000	3,30	33,0
8000	4,00	40,0
10000	5,56	55,6
12000	7,37	73,5
14000	9,35	93,5
16000	11,56	115,6
17000	14,00	140,0
18000	17,40	174,0

Digitized by Google

Anmerkung. In einem magnetischen Felde von der Stärke H sind H Arbeitseinheiten erforderlich, um die Einheit des Magnetismus auf die Länge von 1 *cm* gegen die magnetisirenden Kräfte zu bewegen. Wenn nun 4π magnetische Linien auf jede Einheit des Magnetismus fallen, so beträgt die während eines Kreislaufes geleistete Arbeit in einem Kubikcentimeter Eisen $\frac{1}{4\pi}\int H\,d\,B$. Sind H und B in $C\,G\,S$ Einheiten gegeben, so ist die Arbeit in Erg für das Cubikcentimeter gegeben. Wird daher diese Zahl mit der Zahl der Kreisläufe in der Sekunde multiplicirt und durch 107 dividirt, so ergiebt sich die Zahl der aufgewendeten Watt.

Es muss bemerkt werden, dass der Energieverbrauch steigt, wenn die Magnetisirung in unverhältnissmässigem Grade gesteigert wird; wenn z. B. $B = 18000$ ist, wird der Verbrauch in Watt sechsmal so gross, als wenn $B = 6000$ ist. Man ersieht auch aus Versuchen, dass bei sehr schnellen Kreisläufen der Magnetisirung der Verlust durch Hysteresis geringer ist, als bei langsamen Kreisläufen.

Hopkinson machte darauf aufmerksam, dass die Fläche $\int H\,d\,B$ annähernd einem Rechteck gleich ist, dessen Höhe das Doppelte des Rückstandes und dessen Breite das Doppelte der Coercivkraft beträgt. Ewing hat folgende Werthe der verbrauchten Energie in einem magnetischen Kreislauf bei starker Magnetisirung und für verschiedene Sorten von Eisen und Stahl angegeben:

Untersuchte Probe.	Ergs für das Cubikcentimeter, die in einem vollen Magnetisirungskreislauf verloren gehen
Sehr weiches ausgeglühtes Eisen	9300
Weniger weiches Eisen	16000
Hart gezogener Eisendraht	60000
Ausgeglühter Stahldraht	70000
Glasharter Stahldraht	76000
Klaviersaiten Stahldraht (gewöhnlich)	116000
„ „ (ausgeglüht)	94000
„ „ (glashart)	117000

Hopkinson fand bei einigen Sorten noch höhere Werthe, so z. B., dass in Oel gehärteter Wolframstahl, der wegen seiner grossen Coercivkraft zu Dauermagneten verwendet wird, nicht

Digitized by Google

weniger als 216864 Ergs auf das Cubikcentimeter in einem Kreislauf verbraucht.

Kreislauf in einem Elektromagnet.

Wenn wir von den Eigenschaften der Materialien zu denen eines elektromagnetischen Apparates übergehen, so kann der Kreislauf der Beziehungen zwischen magnetisirender Kraft und Magnetismus noch mittels Diagrammes gezeichnet werden.

Die Fig. 51 bezieht sich auf einen bestimmten Hufeisenmagnet. Die Curve OP stellt die aufsteigende Curve des Elektromagnetes dar, wenn der Anker etwa 2,5 entfernt liegt. Unter diesem Umstande bringt wegen des Widerstandes, den die Luftzwischenräume der Magnetisirung entgegensetzen, eine gegebene magnetisirende Kraft (Ampère-Windungen) weniger Magnetismus hervor, als wenn der magnetische Kreis geschlossen ist. Die zweite Curve QR ist die absteigende Curve desselben Elektromagnetes, wenn der Anker dicht am Kern liegt, also den magnetischen Kreis schliesst.

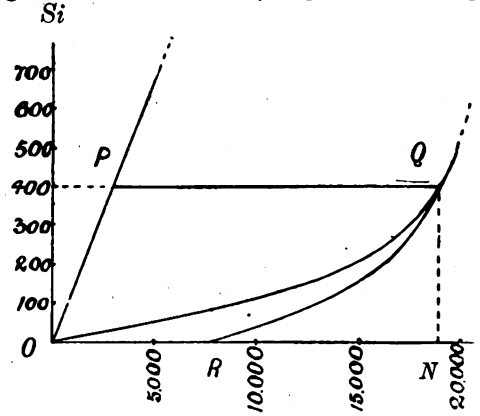


Fig. 51.

Nehmen wir nunmehr einen solchen Elektromagnet, der seinen Anker anzieht. Wir können die aufeinanderfolgenden Vorgänge so betrachten, als wenn sie einen vollständigen Hub bewirken, genau in derselben Weise, wie der Ingenieur den Kreislauf der Vorgänge bei dem Kolbenhub im Cylinder erläutert.

Wir beginnen die Betrachtung bei O; der Anker ist von den Kernen entfernt, der magnetisirende Strom wird geschlossen, und die Magnetisirung steigt bis zu einem, dem Punkte P entsprechenden Zustande. Es möge nunmehr der Anker sich den Kernen nähern. Die Magnetisirung wächst, weil die Bedingung des magnetischen Kreises vollständiger erfüllt wird. Während der Bewegung des Ankers wird mechanische Arbeit geleistet, und da die magnetisirende Kraft constant erhalten wird, stellt die Linie PQ diesen Vorgang dar. Wird nun der magnetisirende Strom unterbrochen, so folgt die Magnetisirung der rechts absteigenden Curve bis R.

Digitized by Google

Während dieses Vorganges wird ein bestimmter Betrag an Energie magnetisch gewonnen. Kann demnächst der Anker in seine anfängliche Lage wieder zurückkehren, so entstehen in dem magnetischen Kreise Zwischenräume, der Rückstand an Magnetismus wird, falls das Eisen weich ist, fast gänzlich verschwinden und die von ihm dargestellte Energie wird zur Erwärmung verbraucht. Die Fläche *OPQRO* stellt die gesammte Energiemenge dar, die magnetisch auf das System verwendet worden ist. Ein Theil, *OQRO* wird durch Hysteresis verbraucht, der andere Theil, *OPQO* wird als mechanische Arbeit nutzbar. In Wirklichkeit geht dies nicht gesondert bei einem Ankerhub vor sich, denn der Anker fängt gewöhnlich schon seine Bewegung an, ehe der Magnetismus bis zum Punkte *P* gestiegen ist; der Anker beginnt auch seine rückläufige Bewegung, ehe der Rückstand an Magnetismus ganz verschwunden ist. Der wirkliche Kreislauf wird nicht durch zwei gerade Linien und zwei magnetische Curven dargestellt, ebensowenig als das wirkliche Diagramm auf der Indikator-Karte aus zwei isothermischen und zwei adiabatischen Linien des idealen Vorganges (Carnots Kreislauf) besteht.

Die Bewegung des Ankers ruft in der Kupferwickelung eine inducirte elektromotorische Kraft hervor, die den magnetisirenden Strom während der Dauer der Bewegung zu schwächen bestrebt ist. Die Wirksamkeit der Anordnung hängt von der Grösse solcher elektromotorischen Gegenkräfte ab und von dem Grade, in dem sie den Arbeitsstrom beeinflussen. Das Diagramm stellt aber nicht die elektrischen Verluste dar, es zeigt lediglich die betreffenden magnetischen Grössen. Stände ein grösserer Raum zur Verfügung, so könnte man in grösserem Masstabe zeigen, wie die Energie elektrisch auf das magnetische System übertragen wird; wie die Näherung des Ankers, indem durch die Verbesserung des magnetischen Kreises die magnetische Induction anwächst, elektromotorische Gegenkräfte erzeugt, und die nutzbare elektrische Energie proportional zu dem Integral-Product des Stromes und der so erzeugten elektromotorischen Gegenkraft wird. Diese Erörterung würde im vorliegenden Kapitel zu weit führen, sie setzt die gesammte Theorie der Wirksamkeit elektrischer Triebmaschinen voraus; es muss in dieser Beziehung auf Abhandlungen über Dynamomaschinen oder über elektrische Kraftübertragung verwiesen werden.

Digitized by Google

Es muss auch hervorgehoben werden, dass das Diagramm nicht den mechanischen Werth der Kraft an irgend einer Stelle des Hubes darstellt. Während der Bewegung, die der Linie *PQ* entspricht und innerhalb der sich der Anker dem Kern nähert, wächst die Anziehung fortwährend. Andererseits erfährt während des Abfallens der Magnetismus einen Uebergang von *R* nach *O*, und anstatt dass Arbeit von dem Anker geleistet wird, wird solche auf ihn verwendet. Es findet sich aber auch eine Analogie mit dem Carnot'schen Kreislauf. Das Diagramm desselben zeigt nicht die Wärmemengen an, die an den verschiedenen Stellen des Kreislaufes betheiligt sind. Wärme wird längs der einen Isotherme eingenommen und längs der andern abgegeben, aber die Länge oder Lage der Isothermen ergibt nicht die Mengen, die auf die Maschine verwendet oder von derselben wieder zurückgegeben worden sind. Wärmewerthe werden durch Carnot's Diagramm der mechanischen Arbeit nicht dargestellt, ebensowenig zeigt mein Diagramm der magnetischen Arbeit die mechanischen Werthe an. In keinem Fall vermag ein Elektromagnet Arbeit zu leisten, wenn nicht eine solche Aenderung in der Systembildung erfolgt, dass die Magnetisirung des magnetischen Kreises geändert wird, die Neigung ist immer derartig, dass die Aenderung die magnetische Strömung zu einem Maximum zu machen sucht.

Magnetisches Wachsthum.

Ewing entdeckte eine andere Art der Nachwirkung, die von ihm „zähe Hysteresis" genannt wurde. Dieser Name soll das allmähliche Wachstum der Magnetisirung bezeichnen, das eintritt, wenn eine magnetische Kraft auf ein Stück Eisen mit absoluter Stetigkeit einwirkt. Das Wachsthum kann eine halbe Stunde oder auch länger andauern und einige Prozente der gesammten Magnetisirung betragen. Es ist eine wirkliche aber langsame magnetische Verzögerung und darf weder mit der Phasenverzögerung verwechselt werden, die bereits unter der Bezeichnung Hysteresis erläutert worden ist, noch mit der scheinbaren Verzögerung, die dem verzögernden Einfluss der Selbstinduction auf den magnetisirenden Strom zuzuschreiben ist oder mit der scheinbaren Verzögerung, die in ungeblätterten Eisenkernen bemerkt wird, und von den in der Eisenmasse selbst kreisenden Wirbelströmen herrührt.

Digitized by Google

Entmagnetisirung des Eisens.

Um eine Eisenprobe von jeglichem zurückbleibenden Magnetismus zu befreien, muss die Probe einer Reihe wechselnder magnetisirender Kräfte mit abnehmender Amplitude unterzogen werden. Denn um den Rückstand, der nach einer Wirkung irgend einer gegebenen magnetisirenden Kraft verblieben ist, zu zerstören, bedarf es der Anwendung einer entgegengesetzten magnetisrenden Kraft von geringerem Betrage als ursprünglich angewendet wurde. Um dies mit Eisenproben auszuführen, kann man das Eisen in eine röhrenförmige Spule bringen, durch die ein Wechselstrom von genügender Stärke geleitet wird, und dann das Eisen allmählig aus der Spule entfernen.

Taschenuhren, die in der Nähe eines kräftigen Elektromagnetes magnetisch geworden sind, können in der beschriebenen Weise entmagnetisirt werden. Eine einfachere, aber nicht stets gleich wirksame Methode besteht darin, dass man die Uhr an einer Schnur aufhängt, sie in die Nähe des Poles eines kräftigen Elektromagnetes bringt und durch Drillen der Schnur in schnelle Umdrehungen versetzt; während der Drehungen entfernt man die Uhr von dem Pole.

Entmagnetisirende Wirkungen der Pole auf sich selbst Eigenschaften kurzer Eisenstücke.

Man sagt zuweilen, dass die Pole eines Magnetes eine selbst entmagnetisirende Kraft hervorzurufen streben. Thatsache ist, dass Ringe und andere geschlossene magnetische Kreise einen grösseren Betrag von Dauermagnetismus zeigen, als in sich ungeschlossene Eisenstücke. Es lässt sich dies in folgender Weise erklären. Erstens, die Fähigkeit Magnetismus zurückzubehalten, ist eine Eigenschaft, die nur bei festen Körpern, niemals bei irgend einer Flüssigkeit oder irgend einem Gase, die von magnetischen Kraftlinien durchsetzt waren, gefunden worden ist; auch ist eine solche Eigenschaft bei keinen Metallen beobachtet worden, die gewöhnlich als unmagnetisch bezeichnet werden. Einen magnetischen Strom in einem magnetischen Kreise, gleichviel, ob in Luft oder Eisen hervorzurufen, erfordert zweitens die Aufwendung von Arbeit; und so lange der magnetische Strom besteht, stellt er einen Vorrath an potentieller Energie dar, ebenso wie

Digitized by Google

eine gespannte Feder[1]). Drittens: die potentielle Energie strebt immer einem Minimum zu. Wenn deshalb ein magnetesirtes System sich selbst überlassen wird, und die einwirkenden Kräfte entfernt werden, so ist sofort für den ganzen Magnetismus das Bestreben vorhanden, zu verschwinden, falls nicht zwischen den Theilen des Systems eine solche wechselseitige Wirkung besteht, die jene Theilchen in dem Zustande zu erhalten streben, in dem sie verlassen worden sind. In Flüssigkeiten und Gasen giebt es eine derartige Wechselwirkung nicht; sie verlieren sofort den Magnetismus. Indessen ist in Magneten aus Eisen eine derartige Wechselwirkung zwischen den Theilchen[2]) vorhanden. Die Folge davon ist, dass, wenn der magnetische Strom voll durch das Eisen geht (wie es der Fall ist bei Ringelektromagneten und bei den mit ihren Ankern wirklich in Contact stehenden Hufeisenelektromagneten), ein grosser magnetischer Rückstand von einiger Dauer entsteht. Wird der eiserne Kreis durch Herstellung eines dünnen Spaltes unterbrochen, so muss nunmehr der magnetische Strom durch eine Schicht Luft hindurch gehen, die nicht allein verhältnissmässig undurchlässig ist, sondern selbst das Bestreben hat, entmagnetisirt zu werden. Der nämliche Rückstand an (dauermagnetischer) Kraft, der, wenn nur in Eisen wirkend, ausreichend war, einen beträchtlichen Strom in dem Eisenkreis zu unterhalten, ist unfähig, diesen Strom durch den kleinen Luftzwischenraum aufrecht zu erhalten, und der Strom wird in diesem Theil des magnetischen Kreises zugleich schwächer, genau so, wie es der Fall ist bei dem Strom durch die polaren Theile eines Dauermagnetes, wenn der Anker abgenommen wird. (Siehe die Fig. 87). In einem Ring aus weichem Eisen aber wirkt jeder Theil als schliessender Anker für den übrigen Theil, und

1) Der Vergleich ist sogar treffender, als es auf den ersten Blick scheint. Ist die Feder vollkommen elastisch, so wird die ganze beim Biegen derselben aufgewendete Arbeit zurückgegeben, wenn der Feder gestattet wird, zurückzugehen. Ist sie aber unvollkommen elastisch, so kehrt sie, nachdem ihr gestattet ist, sich abzuspannen, nicht ganz zu ihrer ursprünglichen Form zurück, zeigt vielmehr eine rückständige Spannung, welche daher rührt, dass beim Abspannen der Feder nur ein Theil der aufgewendeten Arbeit zurückgegeben worden ist. Ein Theil ist verloren, indem er in Wärme übergegangen und den Theil der Wirkung hervorgebracht hat, welcher „dauernd" geblieben ist. Dieses ist vollkommen ähnlich dem Arbeitsverlust durch Hysteresis beim Magnetisiren eines Eisenstückes.

2) Siehe Ewing's Theory of Magnetism. S. 110.

Digitized by Google

wenn an einer Stelle diese Ankerthätigkeit in der angegebenen Weise aufgehoben wird, so fällt der Magnetismus aller übrigen Theile plötzlich stark ab. Folglich hat eine Lücke in dem magnetischen Stromkreise das Bestreben zu entmagnetisiren.

Nach der alten Anschauung sagte man, dass der Magnetismus an der Oberfläche der Pole sich selbst von diesen Stellen seitwärts nach dem neutralen Theil des Magnets hinwegzutreiben strebte.

Geht man auf die Fig. 43 S. 77 zurück, die sich auf das Verhalten von langen und kurzen eisernen cylindrischen Kernen bezieht, so ist leichter zu verstehen, weshalb für die kurzen Kerne die aufsteigenden und absteigenden Curven der Magnetisirung näher aneinander liegen als für die langen Kerne. Man wird auch in der Lage sein, den Grund zu erkennen, weshalb kurze Cylinder und Kreise von Eisen selten rückständigen Magnetismus zeigen, überhaupt keine Spuren der vorangegangenen Magnetisirung aufweisen. Geht man auf eingehende theoretische Erörterungen hinsichtlich der Ellipsoideigenschaften[1]) gar nicht ein und überlegt nur, dass solche kurze Stücke, wenn sie unter dem Einflusse äusserer magnetischer Kräfte stehen und von Luft umgeben sind, sehr kleine Theile eines ganzen magnetischen Kreises bilden, so muss man zweifellos einsehen, dass Grund genug vorhanden ist, weshalb sie praktisch als selbstentmagnetisirend anzusehen sind.

Dieser Umstand wird verwerthet; denn es ist bei der Verwendung von Elektromagneten von grösster Wichtigkeit, dass ihre Anker nicht haften bleiben, wenn der Strom unterbrochen worden ist. Zur Beseitigung des magnetischen Rückstandes, der in die Erscheinung tritt, wenn der Kreislauf vollkommen geschlossen ist, sind verschiedene Kunstgriffe in Vorschlag gebracht worden. Hecquet[2]) legt ein dünnes Blatt von Kupfer oder Papier zwischen die cylindrischen Kerne und das Joch. Diese Schicht unmagnetischen Materials, welches in den magnetischen Kreis gebracht worden ist, erhöht um ein Geringes seinen Widerstand und vermindert nur wenig die Magnetisirung. Trotter hat ein ähnliches Auskunftsmittel gefunden, das bei den Feldmagneten gewisser Dynamomaschinen Verwendung findet.

Ein anderes und gebräuchlicheres Auskunftsmittel ist, zwischen Anker und Pol des Elektromagnetes ein Zwischenstück

1) Siehe Ewing in der Ztschrft. The Electrician, Bd. XXIV, S. 340 über eine völlig rein mathematische Erörterung der Ellipsoideigenschaften.

2) Les Mondes XXXVIII 733, 1875

Digitized by Google

irgend eines unmagnetischen Materials anzubringen. In einigen Fällen wird eine Nadel oder ein Stift aus Messing in die Polfläche getrieben, die mit ihrem Kopfe nur wenig über die Oberfläche hervorragen. In anderen Fällen wird ein Streifen Papier oder eine Karte zwischengelegt oder an die Fläche des Ankers oder des Poles angeklebt.

Ewing's Theorie der inducirten Magnetisirung.

Professor Ewing hat vor Kurzem eine Theorie des inducirten Magnetismus zur Erörterung der in magnetischen Kreisen beobachteten Erscheinungen aufgestellt. Indem er den Grundsatz von Poisson und Weber annimmt, dass ein Magnet als eine Vereinigung vieler Elektromagnete, die schon alle vorher magnetisirt sind, angesehen werden müsse, und dass die Magnetisirung lediglich darin besteht, die Elementarmagnete zu richten, hat er gezeigt, dass es nicht nothwendig ist, wie Maxwell und andere es thun, das Vorhandensein innerer reibender Kräfte, die der Bewegung der Molekularmagnete widerstreben, vorauszusetzen. Ebenso wenig ist es erforderlich, die Voraussetzung zu machen, dass im unmagnetischen Zustande die Moleküle sich selbst in geschlossenen Ringen und Ketten gruppiren, wie Hughes es hinstellt

Ewing hat in der That gezeigt, dass die Erscheinungen erklärlich sind, wenn man voraussetzt, die elementaren Molekularmagnete seien den wechselseitigen magnetischen Kräften unterworfen. Er hat dieses dargestellt, indem er ein Modell aus einer grossen Zahl beweglich aufgehängter Magnetnadeln bestehend herrichtete. Letztere sind in einer bestimmten Entfernung von einander angeordnet und nehmen bei der Abwesenheit äusserer magnetischer Kräfte solche Stellungen ein, dass sie nur eine gegenseitige Neutralisation der ganzen nach aussen gerichteten Wirkung, herbeiführen. Die Lage der einzelnen Nadeln in der Menge ist dabei verschieden, überhaupt nicht in der einen Richtung mehr als in der andern gerichtet. Auf eine solche Vereinigung von Kompassnadeln bringt eine äussere magnetische Kraft, wenn sie klein ist, nur eine kleine und genau proportionale Wirkung hervor; und wenn eine Bewegung eingetreten war, kehren nach Aufhören derselben die Nadeln in die Lage zurück, in der sie sich vorher befanden. Dies entspricht der Thatsache, dass kleine magnetische Kräfte keine bleibende Magnetisirung in einem Material von irgend welcher Gestalt hervorbringen. Vergrössert man die äussere magnetisirende Kraft, so gelangt man zu einem Punkt, in dem bei

Digitized by Google

weiterem Anwachsen für einzelne Gruppen von Nadeln ein plötzlicher Umsturz im Gleichgewicht hervorgerufen wird, und eine oder mehrere Nadeln plötzlich herumschwingen und eine neue Lage einnehmen. Diese Unbeständigkeit und das plötzliche Anwachsen der Zahl der nach einer Richtung zeigenden Nadeln entspricht der Unbeständigkeit und dem plötzlichen Anwachsen der Durchlässigkeit, besonders in weichem Eisen. Dies findet seine Bestätigung in dem plötzlichen Emporsteigen der aufsteigenden Magnetisirungscurve, sobald die magnetisirende Kraft einen gewissen Werth erreicht. Wenn, nachdem einige der Nadeln auf solche Weise neue Gleichgewichtslagen eingenommen haben, die äussere magnetisirende Kraft wieder entfernt wird, so kehren die Nadeln nun nicht mehr in ihre ursprünglichen Lagen zurück; sie behalten ihre Stellung zum Theil ein, und es ist Thatsache, dass das Ganze wie ein Magnet wirken kann.

Diese Erscheinung entspricht dem zurückbleibenden Magnetismus, der nach der Anwendung einer genügenden grossen magnetisirenden Kraft stets beobachtet wird. Wie der zurückbleibende Magnetismus, so kann er beinahe vollständig und plötzlich durch mechanische Stösse vernichtet werden. Ferner wird, wenn eine sehr grosse äussere magnetisirende Kraft angewandt wird, die Gesammtheit der Nadeln sich umdrehen und nahezu nach derselben Richtung zeigen, indem ihre eigene gegenseitige Wirkung verhältnissmässig zu schwach und nicht geeignet ist, sie mehr beiseite zu drehen; aber eine noch grössere Kraft wird fähig sein, eine etwas stärkere Richtwirkung hervorzurufen. Alle diese Dinge entsprechen so genau dem Verhalten magnetischer Körper, dass sie die Theorie als eine sehr zweckdienliche erscheinen lassen. Der Arbeitsverlust in Folge der Hysteresis ist in dem Modell durch den Arbeitsverlust dargestellt, der dadurch entsteht, dass die Nadeln die Luft verdrängen müssen, wenn sie plötzlich herumschwingen, um neue Stellungen einzunehmen, und wenn sie ferner noch hin- und herschwingen, bis sie durch unvermeidliche Wirkungen, wie durch Reibung und Wirbelströme zur Ruhe gebracht werden. Was die weiteren auffallenden Aehnlichkeiten betrifft, die hinsichtlich der Kräftewirkungen, der Temperatur und dergleichen durch das Modell veranschaulicht sind, so muss der Leser auf Professor Ewing's Originalabhandlung[1]) verwiesen werden.

1) Proc. Roy. Soc. 19. Juni 1890, ferner The Electrician XV, S. 514, 541 und 550.

Digitized by Google

Kapitel IV.

Grundgesetz des magnetischen Kreises. Gesetz der magnetischen Zugkraft bei der Berührung von Anker und Pol. Einrichtung von Elektromagneten für grösste Tragkraft.

In diesem Kapitel wird das Gesetz des magnetischen Stromkreises in seiner Anwendung auf den Elektromagnet erörtert und im Besonderen bei einigen Versuchsergebnissen verweilt, die von Zeit zu Zeit von verschiedenen Autoritäten, beispielsweise hinsichtlich der Beziehung zwischen der Bauart der verschiedenen Theile eines Elektromagnetes und dem Erfolg jener Bauart bei ihrer Ausführung erlangt worden sind. Wir haben uns nicht allein mit der Grösse, dem Querschnitt, der Länge und dem Material der eisernen Kerne und der eisernen Anker zu beschäftigen, sondern auch insbesondere die Art und Weise zu erörtern, in der die Gestaltung des Kernes und des Ankers die Leistung des auf seinen Anker wirkenden Elektromagnetes beeinflusst, gleichviel ob der Anker dicht am Elektromagnet liegt oder von ihm entfernt ist. Aber bevor wir in den letzten schwierigen Theil des Gegenstandes eintreten, werden wir uns ausschliesslich mit dem Gesetz der Kraftwirkung des Magnetes auf seinen Anker für den Fall beschäftigen, wenn die beiden mit einander in Berührung sind; in andern Worten mit der Tragkraft.

Grundgesetz des magnetischen Kreises.

Die historische Entwickelung des Grundgesetzes des magnetischen Kreises ist in der Vorrede erwähnt worden. Dort ist gezeigt worden, wie der Gedanke bei der Betrachtung der That-

Digitized by Google

sachen sich mit Nothwendigkeit herausbilden musste. Das Gesetz des magnetischen Kreises wurde erst 1873 von Professor Rowland zu Baltimore zur Gestaltung gebracht. Betrachtet man einen einfachen Fall und findet (ebenso wie der Elektriker hinsichtlich des elektrischen Kreises) einen Ausdruck für die magnetisirende Kraft, deren Bestreben es ist, den Magnetismus durch den Kreis zu treiben, dividirt jenen Ausdruck durch den gesammten, der Magnetisirung entgegenstehenden Widerstand des Kreises, so ergibt der Quotient dieser beiden Grössen den gesammten Betrag der magnetischen Strömung. Man berechnet demnach die Menge Magnetismus, die in dieser Weise durch den magnetischen Kreis tritt, in derselben Weise, wie man die Stärke des elektrischen Stromes nach dem Ohm'schen Gesetze feststellt. Rowland ging aber noch weiter und wandte diese richtige Berechnung auf die Versuche an, die Joule dreissig Jahr früher angestellt hatte. Aus diesen Versuchen folgerte er den Grad der Magnetisirung, auf den Joule das Eisen seiner Magnete gebracht hatte, und gelangte durch Schlussfolgerung zu dem Betrag des Stromes, den er hatte erzeugen müssen. Das Gesetz muss nunmehr in einer Form geschrieben werden, die für die fernere Berechnung benutzt werden kann. Um es in Worten, ohne Anwendung von Zeichen, auszudrücken, müssen wir zuerst aus der Zahl der Drahtumwindungen der Spule und aus der Zahl der Ampère des durch die Windungen fliessenden Stromes die gesammte magnetomotorische Kraft berechnen — Alles das, was den Magnetismus durch das Eisenstück zu treiben strebt. Die Kraft ist in der That proportional der Stärke des Stromes und der Anzahl der Windungen. Demnächst ist der Widerstand zu bestimmen, den der magnetische Kreis dem Durchgange der magnetischen Linien entgegensetzt. Diese Bezeichnung von Joule wurde später von Rowland angenommen. Der Kürze halber kann man einfach vom magnetischen Widerstand sprechen. Olivier Heaviside hat als einen geeigneten, unterscheidenden Ausdruck die Bezeichnung magnetisches Widerstreben [1] vorgeschlagen, damit der Widerstand gegen Magnetismus im magnetischen Kreise mit dem Widerstand gegen das Fliessen des Stromes im elektrischen Kreise nicht verwechselt wird. Nach-

1) Anmerkung des Uebersetzers. Bei der Uebersetzung ist für reluctance = Widerstreben der in Deutschland gebräuchliche Ausdruck „magnetischer Widerstand" beibehalten worden.

Digitized by Google

dem diese zwei Grössen gefunden sind, gibt der Quotient derselben eine Zahl, die eine Menge oder eine Anzahl der durch den Kreis fliessenden magnetischen Linien darstellt. Wenn wir den auf dem Kontinent gebräuchlichen Ausdruck anwenden, so kann man die Grösse als die magnetische Strömung bezeichnen, indem die Strömung des Magnetismus ähnlich der Strömung der Elektrizität ist. Das Gesetz des magnetischen Kreises lautet demnach:

$$\text{Magnetische Strömung} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}}{\text{magnetischen Widerstand.}}$$

Für die Behandlung des Gegenstandes ist es bequemer Buchstaben zu gebrauchen. Für die Zahl der Windungen einer Wickelung wird der Buchstabe S, für die Stärke des elektrischen Stromes oder die Zahl der Ampère der Buchstabe i, für die Länge des Stabes oder des Kernes der Buchstabe l, für die Querschnittsfläche der Buchstabe A, für die Durchlässigkeit des Eisens der Buchstabe μ und für die gesammte magnetische Strömung, die Zahl der magnetischen Linien, der Buchstabe N benutzt. Dann lautet das Gesetz:

$$\text{Magnetomotorische Kraft} = \frac{4\,\pi\,Si}{10},$$

$$\text{Magnetischer Widerstand} = \Sigma\,\frac{l}{A\,\mu},$$

$$\text{Magnetische Strömung } N = \frac{\frac{4\,\pi\,Si}{10}}{\Sigma\,\frac{l}{A\,\mu}}.$$

Wenn wir die Zahl der Windungen mit der Anzahl Ampère des Stromes multipliciren, so dass der ganze Betrag des kreisenden Stromes in Ampère-Windungen erhalten wird, multipliciren mit $4\,\pi$ und dividiren durch 10 (d. h. vervielfachen die Ampère-Windungen mit 1,257), um die richtige Masseinheit zu erhalten, so liefert diese Rechnung die magnetomotorische Kraft. Was den magnetischen Widerstand anbelangt, so ist derselbe so zu berechnen, wie der Widerstand eines elektrischen Leiters oder der Widerstand eines Wärmeleiters hinsichtlich der Wärmeströmung. Der Widerstand ist proportional der Länge, umgekehrt proportional dem Querschnitte und umgekehrt proportional der Leitungsfähigkeit, oder, in dem vorliegenden Fall, umgekehrt proportional der magnetischen Durchlässigkeit. Ist der Kreis einfach, so ist die Länge

Digitized by Google

zu ermitteln und durch die Querschnittsfläche und die Durchlässigkeit zu dividiren. Dadurch erhält man den magnetischen Widerstand. Wenn aber der Kreis kein einfacher ist, wenn wir keinen einfachen Eisenring von überall gleichmässigem Querschnitt haben, so muss der Kreis ebenso in Theilen betrachtet werden, wie es beim elektrischen Kreise geschieht, indem die Widerstände der verschiedenen Theile einzeln bestimmt und zusammengezählt werden. Da eine Anzahl solcher gleichartiger Grössen zu addiren ist, so muss dem Ausdruck für den magnetischen Widerstand das Summationszeichen Σ vorausgesetzt werden. Es folgt aber keinenfalls, dass auch die Berechnung eine sehr einfache sein wird.

Mit den magnetischen Kraftlinien kann man nicht so verfahren wie mit den elektrischen Strömen. Ein elektrischer Strom kann (vorausgesetzt, dass er keine Spannung von 10000 oder mehr Volt besitzt) auf einen kupfernen Leiter durch eine angemessene Schicht von verhältnissmässig starkem Isolirmaterial beschränkt werden; — „starkem“ ist hier sowohl in mechanischem wie elektrischem Sinne gebraucht. — Es gibt Materialien, deren Leitungsfähigkeit für Elektrizität im Vergleich mit Kupfer vielleicht viele Millionen mal geringer angesehen werden kann; das heisst, es gibt praktisch vollkommene Isolatoren. Für den Magnetismus bestehen keine derartige Isolirmittel. Die beste Isolirende Substanz für den Magnetismus ist sicherlich nicht 10000 Mal weniger durchlässig für den Magnetismus als die beste bekannte magnetisirbare Substanz, nämlich des Eisens von bester Beschaffenheit. Handelt es sich um Elektromagnete, deren gebogene Eisentheile mit Kupfer oder mit Luft oder anderem elektrischen Isolirmaterial umgeben sind, so hat man es mit Substanzen zu thun, deren Durchlässigkeit, anstatt unendlich klein zu sein, im Vergleich mit derjenigen des Eisens sehr beträchtlich ist.

Wir haben uns hauptsächlich mit Eisen zu beschäftigen, das gut magnetisirt worden ist. Seine Durchlässigkeit beträgt im Vergleich zu der der Luft etwa 1000 bis 100; das heisst die Durchlässigkeit der Luft steht zu derjenigen des Eisens in keinem ungünstigeren Verhältniss als $^1/_{100}$ bis $^1/_{1000}$. Es lässt dies erkennen, wie es recht wohl möglich ist, dass eine beträchtliche Zerstreuung magnetischer Kraftlinien in die Luft eintritt. Geschieht letzteres, so werden die Berechnungen verwickelt und eine genaue Bestimmung des wahren magnetischen Widerstandes irgend eines Theils des Kreises wird verhindert. Nimmt man aber an, dass

Digitized by Google

alle diese Schwierigkeiten überwunden und die Berechnungen des magnetischen Widerstandes erfolgt sind, so ergibt die Division der magnetomotorischen Kraft durch den magnetischen Widerstand die Zahl der magnetischen Kraftlinien.

In seiner elementaren Form lässt sich das Gesetz des magnetischen Kreises genau so ausdrücken, wie das Ohm'sche Gesetz für den elektrischen Kreis. Aber als Hauptregel verlangt man das magnetische Gesetz für gewisse Fälle, in denen die Aufgabe nicht darin besteht, aus jenen zwei Grössen die Gesammtzahl der magnetischen Kraftlinien zu berechnen. In den meisten Fällen bedarf man einer Regel, um das Umgekehrte zu berechnen. Wir wollen wissen, wie ein Magnet zu bauen ist, damit er die gewünschte Zahl von Kraftlinien liefert. Wir gehen von der Frage aus: Wir haben so und viel magnetische Kraftlinien nothwendig und wünschen nun den magnetischen Widerstand und die erforderliche magnetomotorische Kraft zu kennen. Der Fall ist dem ähnlich, der jedem Elektriker vorkommt. Er braucht nicht immer das Ohm'sche Gesetz in der gewöhnlichen Form anzuwenden, d. h. die Stromstärke aus der elektromotorischen Kraft und dem Widersand zu berechnen; es ist häufig die Berechnung der elektromotorischen Kraft nothwendig, die einen Strom von gegebener Stärke durch einen bekannten Widerstand treibt. Unsere Hauptaufgabe ist die Beantwortung der Frage: wie viele Ampère-Windungen müssen vorgesehen werden, damit die verlangte Menge Magnetismus durch einen gegebenen magnetischen Widerstand getrieben wird. Deshalb wollen wir das Gesetz etwas anders gestalten. Wenn wir die Zahl der gewünschten Ampère-Windungen kennen, so ist die Bestimmung der Kupfermasse und der Drahtsorte nicht mehr schwierig. Die algebraische Formel ist so umzuformen, dass alle Grössen, ausgenommen die Zahl der Ampère-Windungen, auf die rechte Seite der Gleichung kommen, demnach:

$$Si = \frac{N \Sigma \frac{l}{\mu A}}{1{,}257}.$$

Danach sind die Ampère-Windungen gleich der Zahl der magnetischen Linien, die durch den Kreis gehen, multiplicirt mit der Summe der magnetischen Widerstände und dividirt durch 1,257. Die Zahl 1,257 ist eine Constante, die in die Rechnung eingeht, wenn die Länge l in Centimeter, die Fläche in Quadratcentimeter und die Durchlässigkeit in den üblichen Zahlen ausgedrückt ist.

Digitized by Google

Unter dem durch das Gesetz gegebenen leitendem Gesichtspunkt können die verschiedenen in Betracht kommenden Verhältnisse nach einander geordnet und erläutert werden. Wenn das Gesetz mit Sachverständniss angewendet wird, so verbleibt keine einzige Thatsache hinsichtlich der Elektromagnete, die nicht zu erklären wäre. Eigenthümlich mag Einiges in der Form sein, es lässt sich aber auf Vernunftgemässes zurückführen, wenn man bestimmen kann, welche Magnetisirung man unter gegebenen Umständen erhält, oder wie viel magnetisirende Kraft nothwendig ist, um eine gegebene Grösse der Magnetisirung zu erlangen. Das Wort „Magnetisirung" ist hier im gewöhnlichen Sinne, nicht in dem öfters angewandten engeren mathematischen Sinne gebraucht. Letzteres ist beispielsweise der Fall bei dem magnetischen Moment der räumlichen Einheit des Materials. Hier wird das Wort lediglich zur Bezeichnung der Thatsache gebraucht, dass das Eisen oder die Luft, oder ein anderer Stoff einem Verfahren unterworfen worden sind, in Folge dessen magnetische Linien erzeugt werden.

Das Gesetz der Tragkraft.

Wir wollen nun das Gesetz des magnetischen Kreises in erster Stelle auf die Anziehung bei der Berührung von Anker und Pol anwenden; d. h. auf die Tragkraft der Elektromagnete. Das Gesetz der Tragkraft war in dem vorhergehenden Kapitel als erwiesen angenommen worden und bildete die Grundlage einer Methode zur Messung des Betrages der magnetischen Durchlässigkeit. Das Gesetz der magnetischen Tragkraft wurde ein für allemal durch Maxwell in seiner Abhandlung festgelegt und lautet wie folgt:

$$P\,(\text{Dynen}) = \frac{B^2 A}{8\,\pi},$$

wenn A die Fläche in Quadratcentimetern bedeutet. Daraus erhält man

$$P\,(\text{Gramm}) = \frac{B^2 A}{8\,\pi \times 981}.$$

Demnach ist der Zug in Grammen auf das Quadratcentimeter gleich dem Quadrate der magnetischen Induction B (die Zahl der magnetischen Kraftlinien auf das Quadratcentimeter), dividirt durch $8\,\pi$ mal 981.

Zur Vermeidung von Umständlichkeiten ist aus dem Gesetz der Tragkraft die folgende Tafel berechnet, in der die Kraft

Digitized by Google

in Grammen für das Quadratcentimeter neben dem entsprechenden Werth von B sich findet.

Magnetisirung und magnetische Tragkraft.

B Kraftlinien auf das *qcm.*	Dynen auf das *qcm.*	Gramm auf das *qcm.*	Kilogramm auf das *qcm.*
1000	39790	40,56	0,0456
2000	159200	162,3	0,1623
3000	358100	365,1	0,3651
4000	636600	648,9	0,6489
5000	994700	1014	1,014
6000	1432000	1460	1,460
7000	1950000	1987	1,987
8000	2547000	2596	2,596
9000	3223000	3286	3,286
10000	3979000	4056	4,056
11000	4815000	4907	4,907
12000	5730000	5841	5,841
13000	6725000	6855	6,855
14000	7800000	7550	7,550
15000	8953000	9124	9,124
16000	10170000	10390	10,39
17000	11500000	11720	11,72
18000	12890000	13140	13,14
19000	14360000	14630	14,63
20000	15920000	16230	16,23.

Die einfache Darstellung des Gesetzes setzt voraus, dass die Vertheilung der magnetischen Kraftlinien über die ganze betrachtete Fläche gleichmässig ist. Dies trifft nicht immer zu. Wenn die Vertheilung nicht gleichmässig ist, so wird der mittlere Werth der Quadrate grösser als das Quadrat des mittleren Werthes, und in Folge dessen kann der Zug des Magnetes an seinen Endflächen grösser werden, als die Rechnung erwarten, grösser als der Durchschnittswerth von B vermuthen lässt. Bei nicht gleichmässiger Vertheilung über die fragliche Fläche wird der genaue Ausdruck für die Kraft (in Dynen)

$$= \frac{1}{8\pi} \int B^2 dA.$$

Digitized by Google

Die Integration ist hierbei über die ganze Berührungsfläche auszuführen.

Das Gesetz der Tragkraft ist durch den Versuch bestätigt worden. Die entscheidendste Untersuchung wurde im Jahre 1886[1]) durch Bosanquet gemacht, dessen Apparat in Fig. 52 abgebildet ist. Er nahm zwei Eisenkerne und umgab sie beide mit magnetisirenden Spulen, befestigte den oberen Kern unverrückbar und hing den anderen Kern an einen Hebel mit Gegengewicht auf. An dem unteren Ende des letzteren Kernes wurde eine Wagschale befestigt. Die Anziehung des einen Kernes auf den andern wurde gemessen, wenn ein bekannter Strom in bekannter Windungszahl um die Spule floss. Gleichzeitig brachte er eine Untersuchungsspule über der Stossstelle der beiden Kerne an Die Untersuchungsspule war in der im Kapitel III, auf Seite 64 beschriebenen Weise mit einem ballistischen Galvanometer verbunden, so dass in dem Augenblick, wenn die zwei Polflächen sich trennten, oder in dem Augenblick, wenn die Magnetisirung durch Unterbrechung des magnetisirenden Stromes aufgehoben wurde, durch den Ausschlag des Galvanometers genau angegeben wurde, wie viel magnetische Kraftlinien durch jene Untersuchungsspule hindurchgingen. Auf diese Weise lässt sich, wenn die Querschnittsfläche bekannt ist, die Zahl für das Quadratcentimeter berechnen, und mithin B^2 mit dem unmittelbar mittels der Wagschale ermittelten Zuge vergleichen. Bosanquet fand, dass, auch bei nicht durchaus vollkommen bearbeiteter Oberfläche, die Uebereinstimmung sehr genau war, indem der Unterschied nicht mehr als 1 bis 2% betrug, wobei jedoch kleine magnetisirende Kräfte von weniger als 5 *CGS*-Einheiten ausgeschlossen sind.

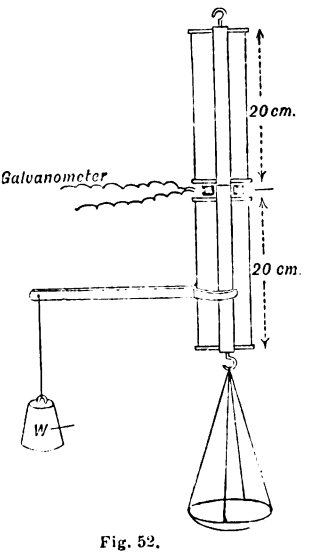


Fig. 52.

Da das Verhalten von Eisen unregelmässig ist, falls die magnetisirenden Kräfte so klein sind, so ist es nicht überraschend, wenn ein Mangel in der Proportionalität gefunden wird. Die

1) Phil. Mag. Dez. 1886; siehe auch The Electrician XVIII, Dez. 3., 1886.

Digitized by Google

Uebereinstimmung ist indessen ausreichend genau, um zu sagen, dass die Versuche das Gesetz bestätigen, dass der Zug proportional dem Quadrate der magnetischen Induction in der Fläche ist, und integrirt über die Fläche.

Anordnung von Elektromagneten auf Zug bei der Berührung von Pol und Anker.

Durch das Gesetz der Tragkraft erlangt man Klarheit über das Wesen der Anordnung von Elektromagneten. Joule hatte ohne mathematische Erörterungen eingesehen, dass zur Beurtheilung eines Elektromagnetes in Bezug auf Tragkraft man zunächst feststellen müsse, wie viel Quadratcentimeter Berührungsfläche der Elektromagnet hat. Er fand, dass man Eisen so hoch magnetisiren kann, bis es mit einer Kraft von 12 *kg* für das Quadratcentimeter Zug ausübt, bezweifelte aber, ob eine Zugkraft von 14 *kg* für das Quadratcentimeter erlangt werden könnte

In der nachfolgenden Tafel sind Joule's Ergebnisse (siehe Tafel Seite 22) wiederholt berechnet und die Werthe *B* abgeleitet:

Joule's neuberechnete Ergebnisse.

Beschreibung des Elektromagnetes.		Querschnitt. Quadratcm.	Gewicht der Last. *kg*	*kg* auf das Quadratcm.	*B.*	Verhältniss der Ankerlast zum Gewicht.
Joule's eigene Elektromagnete.	No. 1	64,5	948	7,35	13600	139
	No. 2	1,26	22	8,75	14700	324
	No. 3	0,28	5,4	9,75	15410	1286
	No. 4	0,0077	0,09	5,7	11830	2384
Nesbit's Henry's Sturgeon's Elektromagnete.		29,1	648	11,2	16550	28
		25,4	386	6,7	12820	36
		1,26	22,6	8,95	14850	114

Man vergleiche nun die Angaben der Tafel Seite 106 in der letzten Spalte mit der ersten. Hier sind verschiedene Werthe von *B*, das heisst die Beträge an Magnetisirung für Eisen angegeben. Es lassen sich nicht mehr als 20000 magnetische Kraftlinien durch das Quadratcentimeter des besten Eisens treiben. Wie ein Zurückgehen auf die Magnetisirungscurven zeigt, ist es bei der praktischen Anordnung von Elektromagneten, aussergewöhnliche

Digitized by Google

Fälle ausgenommen, nicht rathsam, mehr als ungefähr 16000 magnetische Kraftlinien auf ein Quadratcentimeter zu rechnen. Wird z. B. die magnetisirende Kraft von 0 bis 50 gesteigert, so liefert dies in gut bearbeitetem Eisen etwa 16000 Kraftlinien auf das *qcm*. Die Durchlässigkeit ist bei diesem Stande etwa auf 320 herabgesunken. Wenn man die Magnetisirung noch weiter zu treiben sucht, so müssen grössere Aufwendungen gemacht werden. Sollen 1000 Kraftlinien mehr durch das *qcm* gehen, 17000 anstatt 16000, so würde eine ausserordentlich hohe magnetisirende Kraft hinzuzufügen sein, die ganze Kraft von jenem Punkte aus ist zu verdoppeln. Offenbar würde es dann besser sein, ein breiteres Eisenstück zu nehmen, und dieses nicht zu hoch zu magnetisiren. Es lohnt sich deshalb nicht, viel über 16000 Kraftlinien für ein *qcm* hinauszugehen, d. h. nach Massgabe des Gesetzes der Tragkraft lohnt es sich nicht, den Elektromagnet so anzuordnen, dass er mehr als ungefähr 10,5 *kg* auf das Quadratcentimeter trägt. Will man einen Elektromagnet herstellen, der eine Last von einer Tonne tragen soll so würde 1 Tonne = 1000 *kg* dividirt durch 10,5 die erforderliche Zahl Quadratcentimeter des bearbeiteten Eisens darstellen. Man würde demnach einen hufeisenförmigen Magnet, oder einen Magnet ähnlicher Gestalt wählen und den Querschnitt berechnen, so dass die ganze ausgesetzte Fläche ausreicht, die Last von 10,5 *kg* auf das Quadratcentimeter zu tragen. Da ein Hufeisenmagnet zwei Pole besitzt, so muss demnach der Querschnitt des Stückes, aus denen er gefertigt ist, etwa 50 Quadratcentimeter Fläche besitzen. Wenn rundes Eisen verwendet worden ist, so müsste der Durchmesser ungefähr 8 Centimeter betragen. Besteht der Magnet aus quadratischem Eisen, so müsste er 7 Centimeter Seitenlänge besitzen.

In Vorstehendem ist der Querschnitt, nicht aber die Länge des Eisens bestimmt. Die Länge des Eisens muss nach dem Gesetz des magnetischen Kreises so kurz als möglich sein. Die Bauart eines Elektromagnetes muss dem Zwecke entsprechen. Der vorliegende Zweck besteht in der Anbringung eines schweren Gewichtes, nicht in der Wirkung auf einen anderen Magneten in einer Entfernung, oder in der Anziehung auf einen vom Magnet durch eine Luftschicht getrennten Anker; es handelt sich nur um Anziehung bei Berührung.

Die Länge ist genügend gross, aber nicht grösser zu wählen, als dass hinreichender Raum für die erforderliche Menge Um-

Digitized by Google

windungen des Drahtes zur Fortleitung eines solchen Stromes bleibt, der die nothwendige magnetisirende Kraft abgeben wird Die letztere muss mittels des Gesetzes des magnetischen Kreises berechnet werden. Wir müssen also die magnetische Strömung und den magnetischen Widerstand berechnen, alsdann die Ampère-Windungen und aus diesen die nothwendige Menge Kupferdraht. So gelangen wir schliesslich zur eigentlichen Länge des Eisenkernes. Wenn die Querschnittsfläche gegeben und der Werth von B vorgeschrieben ist, so wird damit die ganze Zahl magnetischer Kraftlinien N, die durch den Querschnitt gehen werden, bestimmt. Die Länge vermehrt den magnetischen Widerstand. Je grösser demnach die Länge ist, desto grösser muss auch die Zahl der Ampère-Windungen sein; je geringer die Länge ist, desto kleiner braucht die Zahl der Ampère-Windungen zu sein.

Der Elektromagnet sollte in möglichst gedrängter Gestalt hergestellt werden, der Bogen hat, wie bei dem Magnet von Joule, eine möglichst geringe Länge zu erhalten. Die Eisenlänge ist nur so zu bemessen, als nothwendig ist, um die Windungen aufzubringen. Die Länge des Eisens kann man nicht eher genau berechnen, bis wir die Wickelung kennen; diese ist zunächst vorläufig festzusetzen. Nehmen wir einen geraden Eisenstab von unbestimmter Länge an, umwickeln ihn von Ende zu Ende mit einer magnetisirenden Spule. Es würde dann zu beantworten sein, wie dick die Spule sein soll, wie viel Ampère-Windungen auf ein Centimeter Länge erforderlich sind, um einen gewissen Grad der Magnetisirung zu erreichen. Der magnetische Widerstand eines Centimeters der Kernlänge lässt sich genau berechnen. Soll z. B. die Magnetisirung bis zu 16000 magnetische Kraftlinien auf das *qcm* betragen, so wird die Durchlässigkeit = 320 sein. Die Fläche kann beliebig gewählt werden. Es kann also der magnetische Widerstand von einem Centimeter des Leiters bestimmt und dann berechnet werden, wie viel Ampèrewindungen auf das Centimeter Länge erforderlich sein würden, um 16000 magnetische Kraftlinien auf das *qcm* zu erlangen.

Die Eigenschaften des Kupferdrahtes sind bekannt; wir wissen, in welchem Grade er sich durch den Strom erwärmt, wie viel Wärme ein Quadratcentimeter Oberfläche ausstrahlt u. s. w. Die Berechnung, welche geringste Stärke der Kupferdraht mit Rücksicht auf Feuersgefahr besitzen darf, ist deshalb einfach. Ein zu dünner Draht würde nicht zu verwenden sein, weil,

Digitized by Google

wenn wir eine ungenügende Stärke des Kupfers vorsehen, doch die richtige Zahl von Ampère hindurchleiten müssen, um eine genügnde Anzahl Ampère-Windungen auf das Centimeter Länge zu bekommen. Würde man den Strom durch eine Kupferwindung von einer ungenügenden Stärke senden, so wird der Kupferdraht sich überhitzen.

Es muss praktische Rücksicht auf eine nicht zu starke Erwärmung des Drahtes genommen und deshalb eine gewisse Dicke des Kupferdrahtes gewählt werden. Ich habe für gewisse Fälle eine rohe Berechnung gemacht und gefunden, dass es bei den gewöhnlichen kleinen Elektromagneten nicht nothwendig ist, eine Kupferdrahtumwickelung zu verwenden, deren ganze Dicke stärker als ungefähr $1^1/_4$ Centimeter ist. Bei Anwendung dieser Abmessung brauchen wir den Draht nicht über die ganze Länge aufzuwickeln; denn, wenn wir Kupferdraht irgend welcher Abmessung verwenden und denselben so wickeln, dass die Stärke der Wickelung $1^1/_4$ *cm* beträgt, so können wir bei Benutzung von gut bearbeitetem Eisen einen Centimeter Umwickelung für 20 Centimeter Länge des Eisens wirken lassen. Das heisst, wir brauchen nicht mehr als etwa 0,06 *cm* Kupferdicke auf der Aussenseite des Eisens, um jenes unbestimmt lange Stück Eisen, von dem die Rede war, bis zu dem vorbeschriebenen Grad der Sättigung zu magnetisiren, ohne dass dabei die äussere Oberfläche zu stark erhitzt wird. Eine Kupferwickelung von 1 *cm* Längenausdehnung wird, wenn wir bis zur Dicke von $1^1/_4$ Centimeter wickeln, 20 Centimeter Eisen bis zu dem Punkte magnetisiren, bei dem B gleich 16000 ist. Soll der, zu einem Hufeisen gebogene Stab, an einem passenden Anker von gleichem Querschnitt und von gleicher Beschaffenheit, festgehalten werden, so brauchen wir nicht mehr als 1 Centimeter längs der inneren Biegung für je 20 Centimeter Eisen.

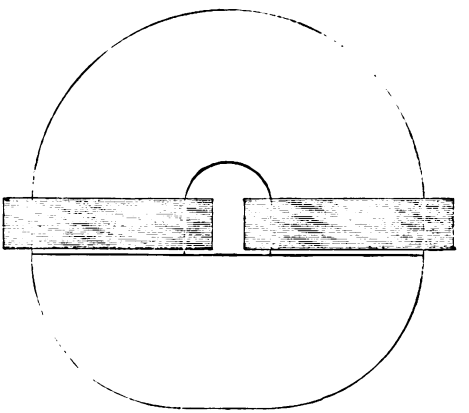


Fig. 53.

Ein ausserordentlich gedrängter Magnet, wie ihn die Fig. 53 zeigt, würde passen, wenn man nur das Eisen durchweg genügend

Digitized by Google

gleichartig erhalten kann. Wenn der Draht anstatt nahe den Polenden ganz um den gebogenen Theil gewickelt werden könnte, so würde, obwohl die Kupferwickelung auf der Innenseite des Bogens $1^1/_4$ Centimeter dick sein würde, sie auf der Aussenseite weniger dick sein. Ein solcher Magnet würde, wenn der Anker mit vollkommener Genauigkeit auf die Polflächen passte, und wenn eine Batterie die erforderliche Zahl Ampère durch die Umwindung sendete, mit einer Kraft von einer Tonne = 1016 *kg* anziehen. Hierbei brauchte das Eisen nur 8 Centimeter im Durchmesser stark zu sein. Es wäre in diesem Falle vorzuziehen, nicht rundes Eisen zu verwenden; Eisen von rechteckigem Querschnitt wäre bequemer; aber das runde Eisen würde weniger Kupfer beanspruchen, weil jeder Umgang die geringste Länge besitzt, wenn der Querschnitt kreisförmige Gestalt hat.

Diese Art der Berechnung bedarf indessen beträchtlicher Abänderung, so bald ein anderer Fall in Frage kommt. Ein gedrängter, kurzer magnetischer Kreis mit grossem Querschnitt ist offenbar für die grösste Tragkraft das Richtige. Die gegebene Magnetisirung und Tragkraft wird mit dem kleinsten Betrag magnetischer Kraft erzielt, wenn die Fläche so gross als möglich und die Länge so klein als möglich gewählt wird.

Es ist jedoch zu bemerken, dass ich noch keine Beweise für die benutzten praktischen Regeln geliefert habe. Ebenso ist Nichts über den Querschnitt des Drahtes gesagt worden; dies ist insofern ohne Bedeutung, als die Ampère-Windungen auf jede gewünschte Weise zu Stande gebracht werden können. Gebraucht man auf einem Magnet einhundert Ampère-Windungen und wendet dünnen Draht an, der ein halb Ampère zulässt, so müssen 200 Umwindungen von dem dünnen Draht aufgewickelt werden. Wählt man dicken Draht, der 10 Ampère ertragen kann, so sind nur 10 Umwindungen erforderlich. Dasselbe Gewicht Kupfer, das durch den entsprechenden Strom zu einem gleichen Wärmegrad erwärmt wird, wird gleiche magnetisirende Kraft haben, wenn es auf den nämlichen Kern gewickelt wird. Die Regeln wegen der Kupferbewickelung sollen später betrachtet werden.

Gewicht und Tragkraft von Magneten.

Von der Zeit Bernoulli's an hat das Gesetz der Tragkraft von Magneten die Aufmerksamkeit in Anspruch genommen. Man hat versucht, die Tragkraft durch eine Beziehung zum Gewicht

Digitized by Google

der Magnete auszudrücken. Hierbei handelt es sich gewöhnlich um Dauermagnete, nicht um Elektromagnete. Bernoulli gab[1]) eine Regel folgender Art an, die gewöhnlich als Häcker'sche Regel bekannt ist

$$P = a \cdot \sqrt[3/2]{W},$$

worin W das Gewicht des Magnetes, P die grösste Last ist, die er tragen kann, und a einen Coefficienten bedeutet, der von der Gewichtseinheit, der Beschaffenheit des Stahles und der Stärke der Magnetisirung abhängt. Ist das Gewicht in Kilogrammen angegeben, so findet man, dass a für den besten Stahl in Magneten von Hufeisenform zwischen 18 und 24 schwankt. Die Formel trifft nur zu, wenn es sich um eine Anzahl Magnete der nämlichen geometrischen Form, etwa gleichgeformter Hufeisen, von derselben Stahlsorte und gleich magnetisirt handelt. Früher hat der Verfasser häufig über die Häcker'sche Formel nachgedacht, wie die Wurzel mit dem Exponenten $^3/_2$ des Gewichts zu der magnetischen Anziehung in Beziehung stehen könnte. Er gelangte schliesslich zu folgender einfacher Erklärung.

Wenn es sich um ein bestimmtes Material, z. B. um harten Stahl handelt, so ist das Gewicht proportional dem Rauminhalt; die Kubikwurzel aus dem Rauminhalt ist proportional der Länge, und das Quadrat der Kubikwurzel ergibt eine Grösse, die proportional dem Quadrate der Länge ist, das heisst, proportional einer Grösse, die eine Fläche darstellt. Diese Fläche bedeutet die polare Oberfläche.

Die auf solche Art analysirte Formel stellt demnach weiter nichts als den mathematischen Ausdruck der Thatsache dar, dass die Zugkraft bei einem gegebenen Material, das in bestimmter Weise magnetisirt worden ist, proportional dem Inhalt der Polfläche ist. Auf dieses Gesetz in seiner einfachen Form scheint Joule gekommen zu sein; in der besondern wissenschaftlichen Form wurde es durch Vergleichung des Gewichts von Magneten mit dem Gewichte, das sie tragen, erlangt.

Wir finden in vielen Büchern den Ausspruch, dass ein guter Magnet sein zwanzigfaches eigenes Gewicht trägt, Niemals ist eine trüglichere Regel niedergeschrieben worden. Es ist richtig, dass ein guter Hufeisenmagnet aus Stahl von 1 Kilogramm Gewicht

1) Acta Helvetica III, S. 233, 1758.

Digitized by Google

auf einem passend gestalteten Anker eine Zugkraft von 20 *kg* auszuüben vermag. Daraus folgt aber nicht, dass ein Magnet von 2 Kilogramm Gewicht fähig sein wird, mit einer Kraft von 40 Kilogramm zu wirken. Denn ein Magnet von 2 Kilogramm Gewicht und der nämlichen Form braucht noch nicht doppelt so starke Pole zu besitzen als der erste. In solchem Falle kommt die Wurzel mit dem Exponenten $^3/_2$ aus dem Gewicht in Frage. Wiegt ein Magnet acht mal so viel, so besitzt er zweimal so grosse lineare und viermal so grosse Flächen-Ausdehnungen; mit der vierfachen Flächenausdehnung eines Magnets der nämlichen Form und gleichartiger Magnetisirung erhalten wir die vierfache Zugkraft. Mit einem Magnet vom achtfachen Gewicht erhält man also nur die vierfache Tragkraft. Die Kraft nimmt unter sonst gleichen Umständen mit der Fläche, nicht mit dem Gewicht zu, und deshalb lässt sich eine Regel darüber nicht aufstellen, wieviel mal ein Magnet sein Eigengewicht trägt.

Es wird als etwas Besonderes hingestellt, dass Isaac Newton einen Magnet besass — einen Magnetstein — den er in einem Siegelring trug und der sein 234 faches Eigengewicht hob. Frobes beschreibt in seinen Lectures on Electricity einen kleinen Elektromagnet von etwa 85 Gramm Gewicht, der eine Last von dem 600 fachen des eigenen Gewichts halten konnte. Der Verfasser besass einen Elektromagnet, der das 2500 fache seines eigenen Gewichts zu heben vermochte. Er war sehr klein und wog mit der Kupferwindung nicht mehr als 0,09 Gramm. Wenn es sich um kleine Gegenstände handelt, so ist die Fläche reichlich proportional dem Gewicht; je geringer die Abmessungen, desto grösser wird das Missverhältniss. Alles dieses zeigt, dass das alte Gesetz der Tragkraft praktisch werthlos war und durchaus zu Nichts führte, dagegen erweist sich das Gesetz, wie es durch Maxwell ausgesprochen und durch das Gesetz des magnetischen Kreises näher erläutert worden ist, als eine äusserst brauchbare Regel.

Berechnung der erforderlichen erregenden Kraft.

Im Kapitel III über die Durchlässigkeit ist für die Berechnung der magnetischen Induction *B* folgende Regel gegeben: Man ermittelt die Tragkraft in Kilogramm und den Flächeninhalt des Querschnitts in Quadratcentimetern, dividirt ersteren Werth durch den zweiten und berechnet die Quadratwurzel aus

Digitized by Google

dem Quotienten, der mit 4967 multiplizirt, den Werth für B ergibt. Es liegt also die Möglichkeit vor, von der Kraft für das Quadratcentimeter auf B, oder von B auf die Kraft für das Quadratcentimeter zu schliessen. Die andere Regel vom magnetischen Kreise setzt uns in den Stand, von den Ampère-Windungen auf B zu sehliessen. Nach Seite 104 ist der Werth für die Ampère-Windungen:

$$Si = \frac{N \cdot \Sigma \frac{l}{A\,\mu}}{1{,}257}.$$

N, d. h. die Zahl der magnetischen Linien im Kreise, ist gleich B, multiplicirt mit A,

$$N = BA.$$

Hieraus lässt sich ein einfacher Ausdruck ableiten, wenn wir die Beschaffenheit des Eisens als bekannt voraussetzen, und ferner annehmen, dass keine magnetische Zerstreuung vorliegt, dass ferner der Flächeninhalt des Querschnitts im ganzen Kreise herum, sowohl in dem Anker wie in dem Magnetkern gleich ist. Dann ist l der mittlere gesammte Weg der magnetischen Kraftlinien im magnetischen Kreise, und es ist

$$Si = \frac{Bl}{\mu} \times \frac{1}{1{,}257},$$

woraus

$$B = \frac{\mu \times Si}{l} \cdot 1{,}257.$$

Nach dem Gesetz der Zugkraft ist

$$B = 4967 \sqrt{\frac{P}{A}}.$$

Es folgt demnach

$$1{,}257 \frac{\mu \cdot Si}{l} = 4967 \sqrt{\frac{P}{A}},$$

$$Si = 3951 \frac{l}{\mu} \sqrt{\frac{P}{A}}.$$

Für die Berechnung des Betrages an erregender Kraft, die für einen, seinen Anker festhaltenden Elektromagnet erforderlich ist, und zwar in dem Falle, in dem ein geschlossener magnetischer Kreis ohne Zerstreuung magnetischer Kraftlinien vorhanden ist, ergibt sich also folgende Regel: Man nimmt die Quadratwurzel der Kilogrammzahl auf das Quadratcentimeter; multiplizirt diesen Werth mit der mittleren Länge (in Centimeter) des ganzen

Digitized by Google

Eisenkreises; dividirt durch die Durchlässigkeit (die mit Hülfe der Tafel Seite 106 und Tafel Seite 65 zu berechnen ist); und multiplicirt mit 3951; die so erlangte Zahl ist die Zahl der Ampère-Windungen.

Man gelangt so von der Zugkraft für das Quadratcentimeter zur Zahl der Ampère-Windungen, die erforderlich ist, um jene Zugkraft in einem Magnet von gegebener Länge und der vorgeschriebenen Beschaffenheit zu erzeugen.

Man nehme z. B. einen Magnetkern aus rundem ausgeglühten bearbeiteten Eisen, 1,27 Centimeter im Durchmesser, 20 Centimeter lang, zur Hufeisenform gebogen; als Anker ein anderes Stück, 10 Centimeter lang, so gebogen, dass es mit dem vorgenannten gut zusammenpasst. Wir setzen fest, das Eisen bis zu dem Grade zu magnetisiren, wo es mit 8 Kilogramm auf das Quadratcentimeter Zug ausübt. Aus der Tafel Seite 106 geht hervor, dass B ungefähr 14 000 betragen wird, und Tafel Seite 68 zeigt, dass in diesem Falle μ ungefähr 823 sein wird. Aus diesen Angaben berechnet man, welche Last der Magnet tragen wird, und wie viel Ampère-Windungen umlaufenden Stromes man nöthig haben wird. Es ergeben sich dann Last (an zwei Polen) = 20,30 *kg*,

erforderliche Ampère-Windungen = 407,4.

Bei dieser Berechnung ist vorausgesetzt, dass die Berührungsfläche zwischen Anker und Magnet vollkommen ist. Dies trifft nicht zu; die Verbindungsstelle vergrössert den Widerstand des magnetischen Kreises und deshalb wird Zerstreuung Statt finden. Im Kapitel III Seite 81 ist gezeigt worden, wie diese Wirkungen in Betracht zu ziehen sind; es wird im Kapitel VI gezeigt werden, wie sie in der Berechnung in Ansatz gebracht werden müssen.

Wirkung der Verkleinerung der Polfläche.

Im Widerspruch mit Joule und zu den Gesetzen der Tragkraft, wonach der Zug proportional der Fläche ist, steht eine zuerst von Moll[1]) besprochene Unregelmässigkeit. Nimmt man einen Stabmagnet mit ebenen Polflächen, misst den Zug, den seine Pole auf einen vollkommen ebenen Anker ausüben können, beseitigt dann die Vollkommenheit der Berührungsfläche durch Abrundung und Herstellung einer leicht convexen Polfläche,

1) Edin. Journ. Sci. III, S. 240, 1830; und Pogg. Ann. XXIV, S. 632, 1833.

Digitized by Google

so übt der convexe Pol, der anstatt mit der ganzen, nur mit einem Theile seine Fläche berührt, eine stärkere Kraft aus als der vollkommen ebene. Es ist von verschiedenen Forschern, besonders von Nicklès gezeigt worden, dass man zur Vergrösserung der Zugkraft eines Magnets die Polfläche verkleinern müsse.

Stahlmagnete wurden früher häufig absichtlich mit abgerundeter Oberfläche hergestellt. Man nehme einen graden runden Kern, oder einen Schenkel eines Hufeisens, und einen Eisenstab von gleichem Durchmesser mit ebener Stirnfläche als Anker und misst die Zugkraft, wenn ein gegebener Betrag von Ampère-Windungen wirkt. Darauf entfernt man den Eisenstab, befeilt ihn ein wenig, um ihn an dem Rande dünner zu machen, oder nimmt ein etwas dünneres Stück Eisen, so dass es seine Kraft über eine kleinere Fläche ausübt, so wird eine stärkere Zugkraft eintreten. Wie leicht durch einen Versuch gezeigt werden kann, ergibt sich diese Thatsache. In der Fig. 54 ist ein kleiner Elektromagnet dargestellt, der mit seinen Polen aufwärts gestellt werden kann. Er wurde sehr sorgfältig gefertigt, die Eisenpole wurden sehr genau bearbeitet. Beim Versuch stellte sich heraus, dass die Pole nahezu gleich stark waren, der Pol *A* war etwas stärker als *B*. Deshalb wurde der andere Pol etwas abgerundet. Das Eisenstück *C* ist an einem Ende abgerundet, am andern Ende eben. Der Elektromagnet wurde nun erregt und mittels einer Federwage die Zugkraft auf jeden der beiden Pole gemessen. Wurde das ebene Ende von *C* an den ebenen Pol *A* gelegt, so dass eine vorzügliche Berührung vorhanden war, so fand eine Zugkraft von ungefähr 1 Kilogramm Statt. Wurde das runde Ende von *C* auf den ebenen Pol *A* gelegt, so betrug die Zugkraft ungefähr $1^1/_2$ Kilogramm. Das ebene Ende von *C* an dem runden Pole *B* ergab ungefähr $1^1/_2$ Kilogramm, vielleicht etwas mehr. Bringt man die abgerundeten Flächen zusammen, so ergab sich beinahe genau die nämliche Zugkraft wie zuerst mit den ebenen Flächen. Es möge noch folgender Fall betrachtet werden. Es wird ein Hufeisenmagnet aufgehängt, dessen Pol *B* etwas convex und dessen Pol *A* eben ist. Es wird ein quadratischer Stabanker mit einem Haken angelegt, an den

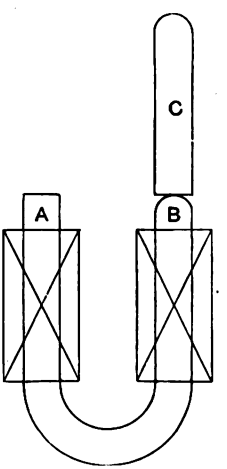


Fig. 54.

Digitized by Google

Gewichte gehängt werden können. Zieht man lediglich die Grösse der Berührungsfläche in Betracht, so würde danach das rechteckige Ende stärker haften, denn es hat mehr Angriffsfläche. Thatsächlich aber haftet das andere fester. In dem bestehenden magnetischen Kreise herrscht ein gewisser magnetischer Widerstand; und die Zahl magnetischer Kraftlinien, die im Kreise erregt wird, hängt von zwei Grössen ab, von der magnetisirenden Kraft und von dem Widerstand des Kreises; abgesehen von geringerer Zerstreuung tritt durch *B* die gleiche Zahl magnetischer Kraftlinien, als durch *A*. Da aber bei *B* in der Mitte eine bessere Berührung ist als an den scharfen Kanten des Poles *A*, sind die Kraftlinien in einen engeren Raum zusammengedrängt, und es beträgt deshalb die Zahl *B* der Kraftlinien auf das Quadratcentimeter mehr. Nimmt man das Quadrat der grösseren Zahl, so wird sie verhältnissmässig noch viel grösser. Wenn wir das Quadrat des kleineren Werthes *B* (bei nicht abgerundetem Pol) mit dem Quadrat des grösseren Werthes *B* vergleichen, so ergibt sich, dass das Quadrat des kleineren Werthes *B* über einer grösseren Fläche integrirt, kleiner ist als das Quadrat eines grösseren Werthes *B* über einer kleineren Fläche integrirt. Es kommt hier das Gesetz des Qnadrates in Betracht.

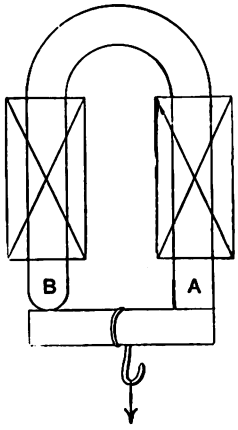


Fig. 55.

Man darf hieraus nicht den Schluss ziehen, dass es von Vorteil sei, beide Pole abzurunden. Durch die Abrundung eines Poles schwächt man an einer Stelle den magnetischen Kreis, der andere Pol haftet in Folge dessen weniger fest.

Als Beispiel betrachten wir einen Magnetpol, dessen Ende aus einem Stück runden Eisens von 2,92 Centimeter im Durchmesser gebildet ist. Der ebene Pol wird eine Fläche von 6,70 Quadratcentimeter haben. Die magnetisirenden Kräfte seien derart, dass $B = 14000$ wird, dann wird die ganze Anziehung nach Tafel Seite 106 52,26 Kilogramm sein, und die wirksame Zahl von Kraftlinien in der Berührungsfläche wird 93800 betragen. Der Pol werde nun durch Abrundung des Randes verkleinert, bis die wirksame Berührungsfläche auf 5,8 Quadratcentimeter vermindert ist, Wenn alle Kraftlinien durch diese Fläche hindurchgedrängt würden, so würde sich ein Betrag von 16172 für das Quadratcentimeter

Digitized by Google

ergeben. Der hinzugekommene Widerstand und der Verlust verringere indessen die Zahl um 2%, verbleiben 15849 für das Quadratcentimeter. Ein Zurückgehen auf Tafel Seite 106 zeigt, dass sich eine Zugkraft von 10,19 Kilogramm auf das Quadratcentimeter ergibt, für die verkleinerte Fläche von 5,8 *qcm* stellt sich also die gesammte Zugkraft auf 59,1 *kg*. Letztere ist also grösser als die ursprüngliche Kraft.

Es möge noch ein anderer, mit demselben Elektromagnet (Fig. 55), angestellter Versuch erwähnt werden. Der Anker ist ebenso gebogen und besitzt einen ebenen und einen abgerundeten Pol. Legt man Ebene an Ebene, Rundung an Rundung und übt in der Mitte einen Zug aus, so trennt sich zuerst Ebene von Ebene; wird aber Rundung an Ebene und Ebene an Rundung gelegt, so findet man jedenfalls, dass beide Pole ungefähr gleich gut haften, — es ist schwer zu sagen, welcher die grösste Zugkraft ausübt. Im Allgemeinen haftet ein abgerundeter Anker weniger fest an dem ebenen Pol, als ein ebener Anker an dem abgerundeten Pol.

Unterschied zwischen flachen und zugespitzten Polen.

Wir sind nun in der Lage, das Ergebniss einiger Untersuchungen zu verstehen, die von Dr. Julius Dub vor ungefähr 40 Jahren gemacht und in Poggendorff's Annalen[1]) mitgetheilt worden sind. Einiger Aufschluss findet sich auch in Dub's nunmehr veraltetem Werke.

Der erste Versuch von Dub bezieht sich auf den Unterschied im Verhalten zwischen Elektromagneten mit ebenen und zugespitzten Polenden. Er stellte zwei cylindrische Kerne aus dem nämlichen Stab weichen Eisens her, jeder war 15 Centimeter lang und 2,5 Centimeter stark. Jeder Kern konnte in eine geeignete magnetisirende Spule eingeführt werden. Der eine Kern besass ein ebenes, der andere ein zugespitztes Ende, d. h. es war so weit kugelförmig zugespitzt, dass die Ebene nur 1,27 Centimeter im Durchmesser betrug. Die Berührungsfläche besass nur $^1/_4$ der Grösse der Berührungsfläche des anderen Kernes. Als Anker wurde ein anderes, 30,5 *cm* langes Stück derselben Eisensorte benutzt. Die Zugkraft des Elektromagnetes auf den Anker wurde

1) Siehe Pogg. Ann. LXXIV, S. 465; LXXX, S. 497; XV, S. 248; CV, S. 49.

Digitized by Google

bei verschiedenen Entfernungen sorgfältig gemessen, die Versuche ergeben Folgendes:

Entfernung Centimeter in	Zugkraft am ebenen Pol *kg.*	Zugkraft am zugespitzten Pol *kg.*
0,	1,5	2,36
0,014	0,5	0,82
0,028	0,41	0,34
0,042	0,32	0,23
0,056	0,27	0,19
0,112	0,17	0,09
0,224	0,09	0,04

Die Ergebnisse sind in den Curven der Fig. 56 geometrisch dargestellt. Bei der Berührung und bei sehr geringer Entfernung besass der verkleinerte Pol die grössere Zugkraft. Bei ungefähr 0,025 *cm* Entfernung herrschte Gleichheit, bei allen grösseren Entfernungen als 0,025 *cm* war der ebene Pol im Vortheil. Bei geringen Entfernungen bewirkte die Zusammendrängung der magnetischen Kraftlinien einen Vortheil für den verkleinerten Pol. Dieser Vortheil wurde bei grösseren Entfernungen mehr als aufgewogen durch die Thatsache, dass bei den grösseren Weiten des Luftzwischenraumes die Anwendung des Poles mit breiter Stirnfläche den magnetischen Widerstand des Zwischenraumes verminderte und eine ausgedehntere Strömung der magnetischen Linien in das Ankerende beförderte.

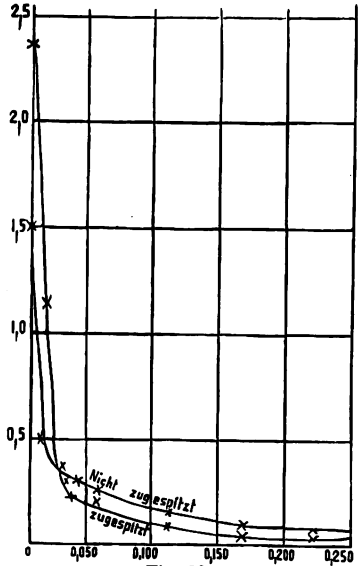


Fig. 56.

Digitized by Google

Untersuchung der Vertheilung des Magnetismus auf Oberflächen.

Das Gesetz der Tragkraft kann auch zur Untersuchung der sogenannten Vertheilung von freiem Magnetismus an der Oberfläche angewendet werden. In der Fig. 17 ist angegeben, wie die Magnetisirungslinien das Innere eines Stabmagnetes durchsetzen und an der Oberfläche hervorbrechen. Wo solche Linien aus der Oberfläche austreten, werden Eisenfeilspähne haften. Früher stellte man diese Thatsache in der Weise dar, indem man sagte, dass an jenen Stellen der Oberfläche freier Magnetismus vorhanden wäre; die Vertheilung des letzteren über die Oberfläche war der Gegenstand häufiger Forschung, grosser mathematischer Schwierigkeit und vieler Versuche. Die Vertheilung der magnetischen Linien bei ihrem Austritt aus der Oberfläche werden wir nach der Methode der Zugkraft untersuchen. Wir gelangen dabei auf ein Mass der Oberflächendichtigkeit des freien Magnetismus. Da die letztere Bezeichnung die alte Idee anregt, dass der Magnetismus zwei Fluida darstelle, von denen das eine an das eine Ende des Magnets und das andere an das andere Ende gebunden ist, so ist der Gebrauch der Bezeichnung nicht zu empfehlen, erfolgt aber, weil letztere mehr oder weniger geläufig ist.

Ein häufig benutzter Weg zur Untersuchung der sogenannten Vertheiluug des freien Magnetismus sei hier erwähnt. Er besteht darin, dass man an verschiedenen Punkten der Oberfläche die Kraft bestimmt, die erforderlich ist, um ein aus einer kleinen Kugel, einem kleinen Ellipsoid oder Eisenstab bestehendes Probestück abzureissen. Diese, ursprünglich von Plücker[1]) herrührende Methode, wurde später auch von Vom Kolke[2]), von Tyndall[3]), von Lamont[4]) und von Jamin[5]) benutzt und ist in Frankreich als die méthode du clou bekannt, weil bei Ausführung der Untersuchung ein eiserner Nagel benutzt werden kann. Plücker selbst verwendete kleine längliche Sphäroide von 14 *mm* Länge und

1) Pogg. Ann. LXXXVI, 1852, S. 11.

2) Pogg. Ann. LXXXI, 1850, S 321; und Wied. Ann. III, 1878, S 437.

3) Pogg. Ann. LXXXIII, 1851, S. 1; und Phil. Mag. April 1851. Siehe auch Tyndall's Diamagnetism, S. 321.

4) Abhandl. der Münchener Akad. VI, 479; und Lamont's Magnetismus, S. 325.

5) Journal de Physique. V, 1876, p. 41; und VII, 1878, S. 38.

Digitized by Google

8 *mm* Durchmesser aus verschiedenen Sorten Eisen und Stahl. Er befestigte sie durch einen Faden an einem Wagebalken. Vom Kolke, benutzte als Prüfungsstab ein Stück weiches Eisen, das 1,7 Gramm wog, 2,6 *cm* lang 0,45 *cm* dick und an dem Ende zugespitzt war. Bei anderen Versuchen benutzte er eine kleine polirte Eisenkugel.

Tyndall verwendete drei geglättete Kugeln aus weichem Eisen von 2,41 *cm* bzw. 1,22 *cm* und bzw. 0,74 *cm* im Durchmesser. Er gelangte zu dem Schlusse, dass die Tragkraft einfach proportional der Stärke des Magnetismus sei. Lamont benutzte einen kurzen, an den Enden abgerundeten Eisenstab. Jamin wendete einen Eisenstab von 15 *cm* Länge und 0,1 *cm* Durchmesser an, brauchte aber der grösseren Bequemlichkeit wegen kurze, in eine kleine eiserne Kugel endigende Eisendrähte. Nach seinen Beobachtungen ist die Zugkraft, die zur Trennung erforderlich ist, proportional dem Quadrate des Magnetismus an dem geprüften Punkte der Oberfläche Die Methode ist von Lamont[1]) und ebenso von Chrystal[2]) erörtert worden. Der Letztere macht die Bemerkung, dass es bei der Verwicklung der Wirkungen, die von der Berührung, Induction und Aehnlichem abhängig sind, nicht sehr leicht sei, die gemessene Menge zu bestimmen. Er fügt hinzu, dass langgeformte Körper vorzuziehen sind; denn bei Anwendung von Körpern von hoher magnetischer Durchlässigkeit und von nahezu sphärischer Form bringen Unterschiede in der Form weit grössere Wirkung in den Ergebnissen hervor als die Aufnahmefähigkeit des Materials.

Der kleine in Fig. 57 abgebildete Apparat ist von Ayrton, in der Absicht hergestellt worden, seine Zuhörer am Finsbury College[3]) zu unterrichten. Ein Stabmagnet *MM* aus Stahl ist seiner ganzen Länge nach mit Centimetermasstab versehen, über der oberen Fläche befindet sich eine kleine Schnellwage, mit einem den Arm *LL* entlang gleitenden Gewicht *W*. Am Ende der Schnellwage wird eine kleine Kugel *B* von Eisen aufgehängt. Bringt man die Kugel mit dem Stabmagnet nahe seinen Enden in Berührung, und gleicht die Zugkraft durch Verschiebung des Gegengewichts entlang dem Arm der Schnellwage aus, so erhält

1) Op. cit. S. 325—28.
2) Encycl. Britannica Practical Electricity Fig. 5 A, S. 24.
3) Siehe Ayrton's Practical Electricity Fig. 5 A, S. 24.

Digitized by Google

man die Zugkraft, die erforderlich ist, um das Stück Eisen abzureissen. Die Zugkraft ist nach der Maxwell'schen Regel proportional dem Quadrate der Zahl magnetischer Linien, die aus dem Stab treten und in die Kugel eintreten. Schiebt man den Magnet einen Centimeter weiter und lässt die Kugel an einer weiter abgelegenen Stelle haften, stellt dann Gleichgewicht her, so ist eine etwas geringere Kraft erforderlich, um die Kugel abzureissen. In dieser Weise lässt sich jeder Punkt untersuchen. Die grösste Kraft, die zum Abreissen erforderlich ist, wird am äussersten Ende gefunden, von da allmählich vorschreitend nimmt sie ab, bis ein Punkt in der Mitte erreicht worden ist, an dem die Kugel nicht anhaftet, weil hier keine magnetischen Kraftlinien nach aussen treten. Die Methode ist nicht vollkommen, weil das Ergebniss offenbar von den magnetischen Eigenschaften der Kugel abhängt, sowie davon, ob sie mehr oder weniger mit Magnetismus gesättig ist. Ueberdies trübt die Gegenwart der Kugel die Messung. Die Zerstreuung in die Luft bildet einen Umstand; die Zerstreuug in die Luft wird aber auch durch die Gegenwart der Eisenkugel gestört, denn letztere nimmt selbst Linien auf; dies ist ein weiterer Umstand. Im besten Falle ist der Versuch unvollkommen, aber belehrend.

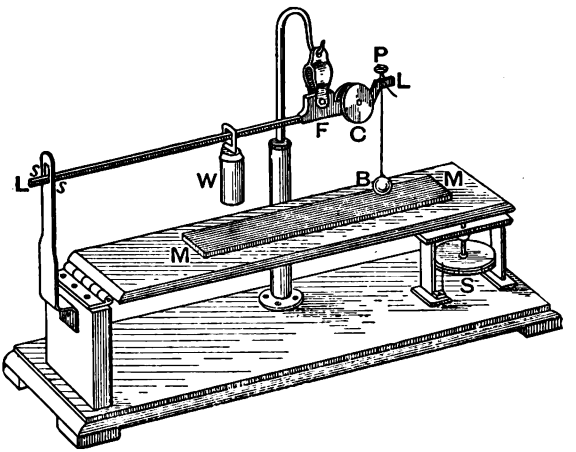


Fig. 57.

Eine vorzügliche Methode zur Untersuchung ist von Rowland vorgeschlagen worden. Man benutzt eine sehr kleine Spule isolirten Kupferdrahtes, die mit einem empfindlichen ballistischen Galvanometer verbunden wird. Die Spule wird zur Oberfläche des Magnets hingeführt und dann plötzlich abgehoben. Der Ausschlag des Galvanometers bestimmt die Stärke der senkrechten Strömung magnetischer Linien am fraglichen Punkte.

Digitized by Google

Wirkung fester auf den Kernenden befindlicher Eisenmassen.

Es werde ein stabförmiger Elektromagnet durch einen Strom erregt. Gegenüber einem Ende des Eisenkernes und ungefähr einen halben Meter davon entfernt befinde sich eine kleine Kompassnadel mit einem daran befestigten Zeiger, so dass beim Eintritt des Stromes der Elektromagnet auf die Nadel wirkt und die Nadel ablenkt. Der Magnet wirkt hier auf eine gewisse Entfernung. Die magnetisirende Kraft wird hauptsächlich nicht aufgewendet, um den Magnetismus durch den Eisenkreis zu treiben; sondern ihn durch die Luft treten zu lassen, von einem Ende des Eisenkernes aus tritt er in die Luft durch die Kompassnadel und weiter in das andere Ende des Eisenkernes über. Die magnetische Strömung wird anwachsen, wenn wir die Strömung der magnetischen Kraftlinien durch die Luft in irgend einer Art fördern. Dies erfolgt dadurch, dass an dem hinteren Ende ein Eisenstück angebracht wird. Die Nadel schlägt dann weiter aus. Nimmt man das Eisenstück weg, so vermindert sich die Wirkung. Es kann demnach bei den Versuchen über Zugkraft bewiesen werden, dass das Hinzufügen einer Eisenmasse an dem Ende eines geraden Elektromagnetes die Zugkraft stark an dem Ende vergrössern kann, mit dem man arbeitet; während andererseits, wenn man dasselbe Eisenstück als Polstück an das vordere Ende bringt, dasselbe die Zugkraft stark vermindert.

Es möge am Versuchstisch ein Stabelektromagnet angeklammert werden, der durch den Strom erregt wird. Mittels eines kleinen Eisenstückes an einer Federwage kann man die Zugkraft messen, die erforderlich ist, um das Eisenstück abzureissen. Es sei bei dem angewendeten Strom die Zugkraft ungefähr 1 *kg*. Bringe ich auf dem vorderen Ende des Kernes einen Block von bearbeitetem Eisen an, so wird er selbst festgehalten, aber die Zugkraft, die er selbst auf das kleine Eisenstück ausübt, ist kleiner als vorhin. Eine Kraft von weniger als $^1/_4$ *kg* genügt zum Abreissen. Ich entferne den Eisenblock von dem vorderen Ende des Kernes und bringe ihn am hinteren Ende an, und finde nun, dass die zum Abreissen des kleinen Eisenstückes von dem vorderen Ende erforderliche Kraft grösser ist, als 1 *kg*. Das vordere Ende übt also einen stärkeren Zug aus, wenn am hinteren Ende eine Eisenmasse angelegt wird. Der ganze Eisenkern, ein-

Digitized by Google

schliesslich sein vorderes Ende, ist stärker magnetisirt worden, weil ein besserer Weg für die magnetischen Linien, um an dem anderen Ende austreten und zurückzufliessen vorhanden ist. Wir haben einfach den magnetischen Widerstand des Luftzwischenraumes im magnetischen Kreise vermindert und hierdurch die Strömung der magnetischen Linien in dem ganzen magnetischen Kreise gefördert. Das Gleiche war der Fall, als die Eisenmasse vor dem vorderen Ende des Kernes angebracht worden war; aber die magnetischen Linien strömten von den Rändern der Eisenmasse rückwärts hinweg und nur wenige blieben vorn, um auf das kleine Stückchen Eisen zu wirken. So erklärt das Gesetz der magnetischen Kreiswirkung dieses Verhalten. Thatsachen wie diese sind lange Zeit hindurch schon denen wohl bekannt gewesen, die sich mit Elektromagneten eingehend beschäftigt haben.

In Sturgeon's Buch findet sich eine Bemerkung, dass Stabelektromagnete besser anziehen, wenn sie am entfernten Ende mit einer Eisenmasse ausgerüstet sind; aber Sturgeon erkannte nicht den Zusammenhang. Die Erfindung der Befestigung einer Eisenmasse an einem Ende eines Elektromagnetes in der Absicht, die magnetische Kraft an dem anderen Ende zu vergrössern, ist Siemens im Jahre 1862 patentirt worden.

Die weiter zu beschreibenden Versuche beziehen sich auf die Anwendung von Polstücken, die am Kern angebracht werden. Diese von Dub angestellten Versuche sind so merkwürdig, dass sie eine besondere Aufmerksamkeit beanspruchen. Hätte ein Ingenieur eine feste Verbindung zwischen zwei Metallstücken zu machen und befürchtete, dass eine blosse Befestigung des einen am andern nicht vollkommen stark wäre, so würde sein erster und natürlichster Gedanke der sein, die zusammenkommenden Theile zu vergrössern, damit eine ausgedehntere Grundfläche geschaffen wird. Dasselbe würde ein, in den richtigen Grundgesetzen des Magnetismus unerfahrener Ingenieur thun, um einen Elektromagnet fester an seinem Anker haften zu lassen. Er würde die Enden oder das eine derselben vergrössern; er würde Polstücke hinzufügen, um dem Anker eine bessere Auflagefläche zu geben. Nichts würde, wie wir sehen werden, unzweckmässiger sein.

Dub wandte bei seinen Versuchen einen geraden Elektromagnet an, der einen cylindrischen weichen Eisenkern von etwa 2,6 *cm* Durchmesser und 31 *cm* Länge hatte; als Anker wurde ein

Digitized by Google

Stück desselben Eisens von etwa 16 *cm* Länge benutzt. Beide hatten ebene Enden. Dann wurden sechs Stücke weichen Eisens von verschiedenem Querschnitte hergestellt, die als Polstücke dienten. Sie konnten entweder an das Ende des Kernes oder an dasjenige des Ankers angeschraubt werden. Zur Unterscheidung wollen wir sie mit den Buchstaben *A*, *B*, *C* u. s. w. bezeichnen. Ihre Abmessungen sind in nachstehender Tabelle enthalten.

Stück.	Durchmesser *cm.*	Länge *m.*
A	5,1	2,6
B	4,6	3,0
C	3,2	5,1
D	5,1	1,3
E	4,8	2,6
F	2,6	5,1

Von den erlangten Ergebnissen wollen wir acht auswählen. Sie sind in den acht Skizzen der Figur 59 dargestellt. Die zum Abreissen des Ankers erforderliche Zugkraft wurde gemessen, ebenso die aus einer gewissen Entfernung ausgeübte Anziehung. Jedenfalls ist zu bemerken, dass, wenn ein Polstück an ein Ende des Magnetes gebracht wurde, sowohl die Zugkraft bei der Berührung wie auch die Anziehung in der Entfernung vermindert wurde; es veranlasste einen Verlust und Zerstreuung der magnetischen Kraftlinien.

Versuch.	Polstück am Magnet.	Polstück am Anker.	Anziehung bei der Berührung.	Anziehung in der Ferne.
I	ohne	ohne	48	22
II	*D*	ohne	30	10
III	*E*	ohne	32	11,5
IV	*C*	ohne	35	13,5
V	*D*	*A*	20	7,5
VI	ohne	*B*	50	25
VII	ohne	*C*	43	25
VIII	ohne	*D*	50	18

Digitized by Google

Der ungünstigste Fall von allen war jener, in dem sowohl an dem Magnet wie am Anker Polstücke lagen. In den letzten drei Fällen war die Kraft grösser geworden, aber es war hier das vergrösserte Stück am Anker angebracht worden, so dass es die eintretenden magnetischen Linien, die seitwärts nach der Grundfläche des Elektromegnetes zurückzufliessen, unterstützte. Das Eisenstück verminderte den magnetischen Widerstand des Rückweges durch die Luft und vermehrte so die Zahl der magnetischen Linien; dabei zerstreute es die aus dem Kernende hervortretenten nicht wesentlich.

Fig. 58.

Das nächste Ergebniss von Dub bezieht sich auf die Wirkung der Hinzufügung von Polstücken an einem Elektromagnet von 31 *cm* Länge, der breitseits angewendet wurde, um eine Kompassnadel in der Entfernung abzulenken (Fig. 59).

Benutztes Polstück	Ausschlag (Grade)
ohne	34,5
A	42
B	41,5
C	40,5
D	41
E	39
F	38

Digitized by Google

In einer anderen Anzahl von Versuchen zu demselben Zwecke war ein Dauermagnet aus Stahl mit den Polen N S bifilar und horizontal aufgehängt, um ihm ein starkes Bestreben in einer bestimmten Richtung sich einzustellen, zu geben. In einem kurzen Abstande seitwärts war der nämliche Stabelektromagnet festgelegt und dieselben Polstücke wurden wieder angewendet. Die Ergebnisse, die bei Anbringung der Polstücke an dem nahen Ende erlangt wurden, sind nicht sehr entscheidend; sie steigerten wenig den Ausschlag. Aber bei dem Fehlen von Angaben des Abstandes zwischen dem Stahlmagnet und dem Elektromagnet ist es schwer, besondere Angaben über alle in Frage kommende Einzelheiten zu machen. Die Ergebnisse waren:

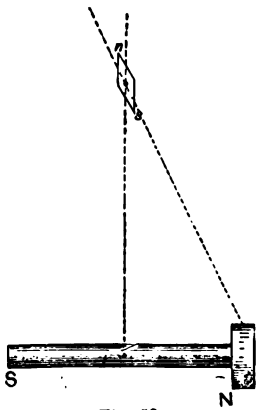


Fig. 59.

Benutzte Polstücke	Ausschlag (Grade)
ohne	8,5
A	9,2
B	9,5
C	10
D	8,8

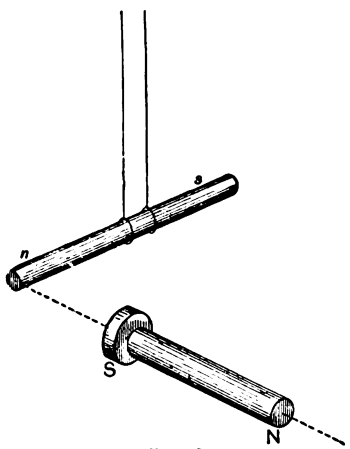


Fig. 60.

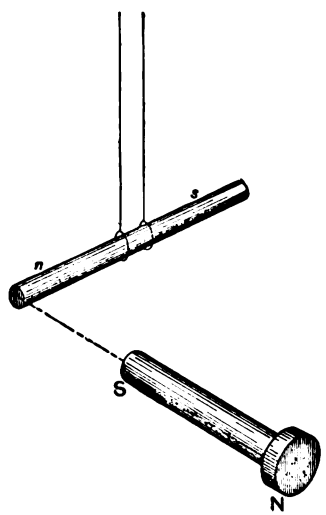


Fig. 61.

Wenn indessen die Polstücke an dem entfernten Ende des Elektromagnetes angebracht wurden, wo ihre Wirkung unzweifel-

Digitized by Google

haft den Austritt magnetischer Linien in die Luft an dem vorderen Ende befördern muss, ohne die Vertheilung dieser Linien in dem Raum vor dem Pole sehr zu beeinflussen, war die Wirkung bemerkbar.

Benutztes Polstück.	Ausschlag (Grade)
ohne	8,5
A	10,0
B	10,3
C	10,3
F	10,1.

Indem wir uns noch auf die Betrachtung der geraden Elektromagnete beschränken, lenke ich die Aufmerksamkeit auf einige Versuche, die im Jahre 1862 von dem verstorbenen Du Moncel über die Wirkung einer polaren Ausdehnung am Eisenkern gemacht worden sind. Er benutzte als Kern eine dünne Eisenröhre, die er mit einem eisernen Pfropfen abschliessen konnte, und um deren Ende er einen eng an den Pol passenden eisernen Ring anbrachte. Die Anziehung, die auf einen in jedem Falle um 1 Millimeter vom Pol abstehenden Anker ausgeübt wurde, mass er mittels einer besonderen Hebelvorrichtung. Die Ergebnisse sind in Folgenden zusammengestellt:

	Ohne Ring am Pol.	Mit Ring am Pol.
der röhrenförmige Kern allein	11	10
der röhrenförmige Kern mit Eisenpfropfen	17	14
Kern, mit einer Eisenmasse am entfernten Ende	27	25
„ mit eisernem Pfropf am entfernten Ende	38	33

Nach Kenntniss dieser Untersuchungen ist der Umstand von Interesse, dass eine so wichtige Thatsache dem aufmerksamen Auge des ursprünglichen Erfinders des Elektromagnetes nicht entgangen war.

In Sturgeon's „Experimental Researches", Seite 113, befindet sich folgende Fussbemerkuug, die augenscheinlich um das Jahr 1832 geschrieben worden ist:

Digitized by Google

„Ein Elektromagnet wie vorstehend beschrieben, der 84 *g* wog und mit einer Drahtspule versehen war, trug 6,4 *kg*. Die Pole waren später so bearbeitet worden, dass sie eine breitere Fläche boten, indem an jedem Ende des cylindrischen Stabes ein viereckiges Stück guten weichen Eisens angeschweisst wurde; durch diese Aenderung wurde die Zugkraft auf ungefähr 2,3 *kg* herabgemindert, obgleich der Magnet so viel als möglich ausgeglüht worden war".

Wirkung der Umkleidung eines Elektromagnetes.

Wir fanden, dass ein gerader Elektromagnet, mag er breitseits oder mit dem Ende benutzt werden, auf eine Kompassnadel aus einiger Entfernung wirken und sie abzulenken vermag. Bei diesen Versuchen gab es keinen Rückweg für die magnetischen Linien, die durch den Eisenkern treten, abgesehen davon, dass die umgebende Luft den Rückweg gewährte. Die Linien flossen in weit ausholenden Curven von einem Ende herum zu dem andern, ebenso ausgedehnt, wie in der Figur 17 das magnetische Feld ist. Was wird geschehen müssen, wenn wir einen Rückweg vorsehen? Der Elektromagnet werde mit einer eisernen Röhre von derselben Länge wie er selbst umgeben, so werden die Linien in einer Richtung durch den Kern fliessen und werden einen leichten Weg zurück längs der Aussenseite der Spule finden. Wird ein auf diese Weise umkleideter Magnet auf einen kleinen aufgehängten Magnet eine kräftigere oder schwächere Anziehung ausüben? Man könnte erwarten, dass schwächere Anziehung stattfindet, denn wenn die magnetischen Kraftlinien einen guten Rückweg durch das Eisen haben, weshalb sollen sie sich in Menge auf eine Entfernung hin durch die Luft drängen, um zum Ausgangsort zurückzukommen? Die Linien werden natürlicher Weise auf dem kürzesten Wege von dem einen Ende des Kernes in die Eisenrohrumkleidung zurückkehren. Das heisst, die Wirkung in die Ferne muss durch die Anbringung der Eisenröhre an der Aussenseite vermindert werden. Bringen wir einen geraden Elektromagnet entweder in der Endlage oder in der Breitseitlage nahe einer Magnetnadel an, so lässt sich das Gesagte durch Versuche feststellen. Man beobachte den Ausschlag der Nadel, wenn der Erregerstrom angelassen wird, und zwar erstens, wenn keine äussere Umkleidung vorhanden ist, zweitens, wenn eine eiserne Umkleidung um den Elektromagnet angebracht ist. In letzterem Falle sieht man, dass beim Angehen des Stromes die Magnetnadel überhaupt fast nicht beeinflusst wird. Die äussere Umkleidung

Digitized by Google

ist die Veranlassung, dass der Elektromagnet eine geringere Wirkung in die Ferne äussert. Indessen ist thatsächlich vorgeschlagen worden, in Telegraphenapparaten und elektrischen Motoren derartig umkleidete Magnete zu benutzen, damit sie eine stärkere Anziehung liefern möchten.

Eisenumkleidete Elektromagnete wie der beschriebene bringen eine geringere Wirkung in der Entfernung durch die Luft hervor als die gewöhnliche Form, es bleibt aber die Frage bestehen, ob sie eine grössere Anziehung bei der Berührung ausüben. Diese Frage ist zu bejahen; denn Alles, was den Magnetismus unterstützt, um nach dem anderen Ende zu gelangen, erhöht die Güte des magnetischen Kreises und vermehrt deshalb die gesammte magnetische Strömung.

Dieser Versuch lässt sich mit einem Apparat anstellen, der im Technical-College zu Finsbury benutzt worden ist. Er besteht aus einem geraden, aufrecht auf einem Grundbrett befestigten Elektromagnet *M*, über dem ein hölzerner Galgen errichtet ist. Durch das Gestell des Galgens geht eine Winde *W*, auf deren Achse eine kleine Seilscheibe mit daran geknüpftem Seile befestigt ist. An dem unteren Ende des Seiles hängt eine gewöhnliche Federwage, deren Haken eine kleine wagerechte eiserne Scheibe *A* trägt, die als Anker wirken soll. Mittels der Winde lässt man die Scheibe auf das obere Ende des Elektromagnetes herab. Wird der Strom angelassen, so wird die Scheibe, angezogen. Indem man die Winde anzieht, wird der Zug nach oben verstärkt, bis die Scheibe abgerissen wird. Es waren bei dem Versuche ungefähr 4 Kilogramm erforderlich, um die Scheibe abzuziehen.

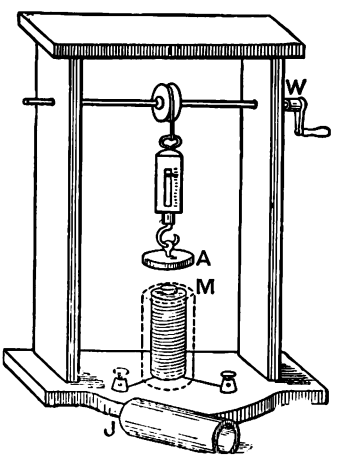


Fig. 62.

Man schiebt nun über den Elektromagnet, ohne irgend welche engere Verbindung mit ihm, eine lose passende Umkleidung *J* aus Eisen – eine Röhre, deren oberes Ende gleich hoch mit der oberen Polfläche steht. Die herabgelassene Scheibe hängt sich jetzt mit ihrer Mitte an den Pol in der Mitte und mit ihrem Rande an

Digitized by Google

die Röhre an. Die Röhre wiegt ungefähr 0,23 *kg* und ist am Boden nicht befestigt. Die Wage misst bis zu 10 Kilogramm und sogar dieser Zug hat jetzt nicht ausgereicht, um die Scheibe abzureissen. In einem Falle wurde die Zugkraft eines geraden Eisenkernes durch das blosse Hinzufügen eines guten eisernen Rückweges zur Vervollständigung des magnetischen Kreises 16 mal so gross. Die Umkleidung ist nicht in allen Fällen zweckmässig, ausgenommen zur Vergrösserung der Zugkraft bei der Berührung von Pol und Magnet. Einen Elektromagnet zu umkleiden, der schon einen eisernen Rückweg besitzt, ist ein Unding. Der von einem Erfinder gemachte Vorschlag, eiserne Röhren an der Aussenseite der Spulen von Hufeisenelektromagneten anzubringen, hat deshalb keine Bedeutung.

Ein weiterer sonderbarer Fall kann ebenfalls durch das Grundgesetz des magnetischen Kreises erklärt werden. Nehmen wir eine eiserne Röhre als inneren Kern, und schneiden von dem Ende derselben ein kleines Stück ab, so dass wir einen Ring von dem nämlichen Querschnitt erhalten. Das kleine Stück werde auf das Ende niedergelegt. Es wird dann mit einer gewissen Kraft festgehalten und leicht abgezogen werden können. Legt man das runde Eisenstück so an, dass es nur einen Punkt des Kreisumfanges berührt, so wird es fester gehalten, weil es sich in einer Lage befindet, in der es die Strömung der magnetischen Kraftlinien vermehrt (Fig. 63). Beim Zusammendrängen der magnetischen Kraftlinien auf eine kleine Berührungsfläche wächst B an diesem Punkte, und B^2, über der kleineren Berührungsfläche integrirt ergibt eine grössere Gesammtanziehung, als wenn der Rand des Ringes überall herum gegen den Rand der Röhre anliegt.

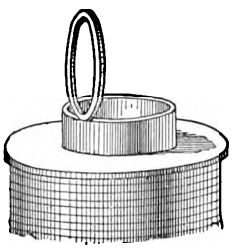


Fig. 63.

Ein fernerer eigentümlicher Versuch ist folgender. Ein stehender cylindrischer Elektromagnet besitzt an einem oberen Ende eine ebene kreisförmige Polfläche von etwa 5 *cm* Durchmesser. Man nimmt eine runde Scheibe aus dünnem Eisen — etwa aus Weissblech — die etwas kleiner als die Polfläche ist, und legt die Scheibe flach auf den Pol. Dann treten die magnetischen Kraftlinien von unten ein, gehen durch die Scheibe hindurch und treten an ihrer oberen Fläche in grosser Menge wieder aus. Es ist aber klar, dass die Kraftlinien nicht sämmtlich, oder auch nur

Digitized by Google

eine beträchtliche Menge derselben, durch die Ränder der dünnen Scheibe seitwärts heraustreten können; denn die Scheibe besitzt nicht genügende Masse, um viele magnetische Kraftlinien zu fassen. Deshalb treten die magnetischen Kraftlinien durch die Scheibe und an ihrer oberen Fläche wieder aus und erzeugen über der oberen Fläche der Scheibe ein magnetisches Feld, das nahezu so stark ist, wie das magnetische Feld unterhalb der unteren Fläche.

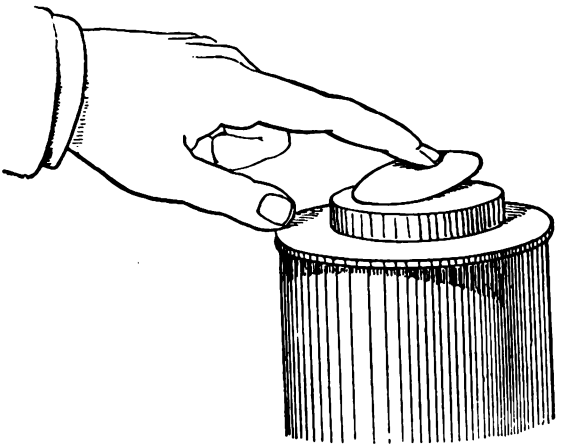


Fig. 64.

Wären die beiden magnetischen Felder genau von gleicher Stärke, so würde die Scheibe nicht angezogen werden. Wie verhält es sich in Wirklichkeit? Wird der Strom angelassen, so sieht man, wie die Scheibe durchaus nicht auf der oberen Fläche des Poles liegen will. Drückt man sie mit dem Finger nieder, so biegt sie sich auf, und es erfordert Kraft, um sie nieder zu halten. Hebt man den Finger, so strebt sie aufwärts. In ihrem Bestreben, den magnetischen Kreis zu verbessern, wird die Scheibe eher eine andere Lage annehmen, als flach auf der oberen Polfläche liegen. (Fig. 64).

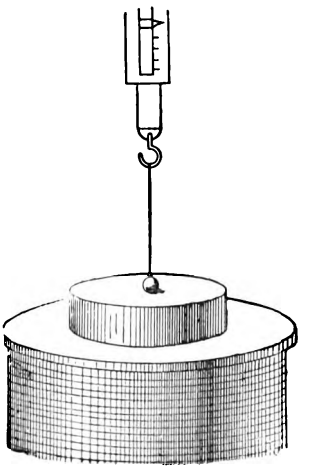


Fig. 65.

Es möge nunmehr die Aufmerksamkeit auf Versuche gelenkt werden, die wir Vom Kolke verdanken und in den Annalen vor vierzig Jahren veröffentlicht worden sind. Sie betreffen die Vertheilung der magnetischen Kraftlinien, die aus der Polfläche eines Elektromagnetes treten. Der erste Versuch wird mit einem geraden Elektromagnet mit cylindrischem Kern und flachem Ende angestellt (Figur 65). In welcher Weise werden die magnetischen Kraftlinien über das Ende sich ver-

Digitized by Google

theilen? Fig. 17, Seite 41, stellt dar, wie die magnetischen Kraftlinien beim Fehlen eines eisernen Rückweges in die Luft sich zerstreuen. Die Hauptzerstreuung findet durch die Enden statt, doch auch etwas an den Seiten. Die Vertheilung am Pol-Ende wollen wir mittels einer kleinen Eisenkugel untersuchen, die an verschiedene Punkte von der Mitte bis zum Rande der Polfläche gelegt wird. Die zum Abreissen der Kugel erforderliche Kraft wird mittels einer Federwage gemessen. Die Zugkraft ist am Rande viel stärker als in der Mitte, wenigstens vier- bis fünfmal so gross. Es findet ein regelmässiges Anwachsen der Zugkraft von der Mitte nach dem Rande zu statt.

Die magnetischen Kraftlinien sind bestrebt, ihren eigenen Kreis zu vervollkommnen und fliessen am zahlreichsten in derjenigen Richtung, in der sie auf der Wanderung ihren Weg stets durch Eisen finden. An allen Rändern und Ecken einer Polfläche treten sie stärker aus. In der Mitte der Endfläche treten sie nicht so stark aus, andernfalls würden sie durch einen breiteren Luftraum gehen müssen, um nach ihrem Ausgangsorte zurück zu gelangen. Das Eisen ist in Folge dessen am Rande herum gesättigter als in der Mitte.

Es ist daher bei einer sehr geringen magnetisirenden Kraft ein grosses Missverhältniss zwischen der Anziehung in der Mitte und der an den Rändern. Mit einer sehr grossen magnetisirenden Kraft erhält man nicht das gleiche ungünstige Verhältniss, weil, wenn der Rand schon stark gesättigt ist, man durch Anwendung stärker magnetisirender Kraft seine Magnetisirung nicht wesentlich vermehren kann, aber durch die Mitte noch mehr Kraftlinien hindurchtreiben kann. Stellt man die Ergebnisse einer Reihe von Versuchen über die Anziehung an verschiedenen Punkten zeichnerisch dar, so nähern sich die erlangten Curven bei grösseren magnetisirenden Kräften mehr einer Geraden als jene Curven, die mit geringer magnetisirender Kraft erlangt werden.

Die von Vom Kolke erlangten Ergebnisse mittels eines vollen cylindrischen Poles von 12 *cm* Durchmesser, den er für jedes halbe *cm* vom Mittelpunkt aus nach dem Rande hin prüfte, sind nachstehend angegeben. Die zum Abreissen einer kleinen eisernen Kugel von 3 *mm* Durchmesser erforderliche Kraft war am Rande fast sechsmal so gross als in der Mitte.

Digitized by Google

Radiale Entfernung vom Mittelpunkt (Centimeter).	0	1/2	1	1 1/2	2	2 1/2	2
Anziehung auf eine kleine Kugel bei Berührung.	8,75	8,75	8,88	9,16	9,40	10,19	10,83
Radiale Entfernung vom Mittelpunkt (Centimeter).	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2	6	
Anziehung auf eine kleine Kugel bei Berührung.	11, 4	12,38	13,52	17,30	25,00	52,20	

Bei dem Versuch wurde der Strom durch eine Grove'sche Zelle geliefert; dagegen wurde bei Vergrösserung der Batterie die Anziehung am Rande und im Mittelpunkt vergrössert, das Verhältniss derselben jedoch verkleinert.

Anzahl der angewendeten Grove'schen Zellen.	Anziehung am Rande.	Anziehung im Mittelpunkte.	Verhältniss der Rand-Anziehung zur Mittelpunkts-Anziehung.
1	52,20	8,75	5,96
2	81,85	19,80	4,20
3	126,50	27,7	5,10
4	227,50	52,25	4,35

Bei einem Versuche von Vom Kolke [1]), bei dem Plücker's grosser Hufeisenmagnet (S. 26) benutzt worden ist, waren eine Reihe von Beobachtungen quer über die 10,2 *cm* Durchmesser besitzende Polfläche, in dem Durchmesser der Richtung *cd*, senkrecht zur Verbindungslinie der Pole, und in dem Durchmesser ab, in der Richtung der Verbindungslinie angestellt worden. Ein kurzes

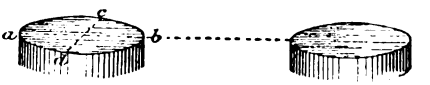


Fig. 66.

1) Pogg. Ann. LXXXI, 321, 150.

Digitized by Google

Stück Eisendraht von 2,6 *cm* Länge wurde für die Abreissversuche benutzt. Bei den Messungen entlang *c d*, (Fig. 66) war der Radius in acht gleiche Theile getheilt; es wurden vier Reihen von Messungen gemacht, während der Elektromagnet auf vier verschiedene Arten erregt worden war:

I. Beide Spulen wurden so erregt, dass eine die andere in der Magnetisirung unterstützte;

II. Beide Spulen wurden so erregt, dass sie sich gegenseitig beeinträchtigten;

III. Nur eine Spule wurde erregt, deren Kern geprüft wurde;

IV. Nur eine Spule wurde erregt, an dem anderen Schenkel geprüft.

Die zum Abreissen des Prüfungsstabes erforderlichen Kräfte betrugen in den vier Fällen:

Entfernung vom Mittelpunkt	I	II	III	IV
8	54,2	30,8	45,2	22,5
7	45,5	27,0	40,0	18,5
6	40,4	22,9	34,0	16,6
5	38,0	21,5	32,0	15,4
4	37,0	19,0	30,0	13,8
3	35,5	17,9	29,2	13,2
2	35,0	17,4	28,1	12,6
1	35,0	17,0	28,1	12,5
0	35,0	16,6	28,0	12,4

Der grosse Abstand der Kerne von 28,4 *cm* mag die Ursache für die hohen Werthe sein, die im II. Falle angegeben sind. Da die Spulen so erregt wurden, dass sie gegeneinander wirkten, so muss in dem die Kerne vereinigenden Joch ein Folgepol bestanden haben. Die sämmtlichen aus jeder Polfläche heraustretenden Kraftlinien gehen ausserhalb zum Folgepol zurück, anstatt dass sie von Pol zu Pol fliessen.

Bei den weiteren Untersuchungen, die entlang dem Durchmesser *a b* gemacht worden sind, fand sich die stärkste Anziehung immer an dem Punkte *b*, dem inneren Rande der Polfläche.

Es ist leicht, diese Verschiedenheit der Vertheilung der Kraftlinien lediglich in der Weise zu beobachten, dass man eine

Digitized by Google

polirte Kugel an das Ende des Elektromagnetes bringt. Das magnetische Verhalten der Kugel ist sehr merkwürdig. Ein rundes Eisenstückchen hat nicht das Bestreben — hauptsächlich aber nicht in sehr starkem magnetischen Felde — sich zu bewegen, wenn das magnetische Feld gleichförmig ist. Das Bestreben einer kleinen eisernen Kugel besteht darin, sich von einem Platze an dem das magnetische Feld schwach ist, nach einem Platze, an dem das Feld stark ist, zu bewegen. Legt man die eiserne Kugel an irgend einer Stelle nahe der Mitte der Polfläche, so rollt sie wie in Fig. 67 dargestellt ist, nach dem Rande zu; sie bleibt nicht in der Mitte liegen. Nimmt man einen grösseren zweipoligen Elektromagnet (wie in Figur 12), so wird der kürzeste Weg für die magnetischen Kraftlinien durch die Luft offenbar durch den Weg zwischen den Polen hindurch von dem Rande der einen zum Rande der andern Polfläche gebildet. Die Kraftlinien sind am dichtesten in der Gegend, wo sie in einem möglichst kurzen Bogen übergehen können. Sie werden weniger dicht sein, wo sie einen grösseren Bogen bilden müssen.

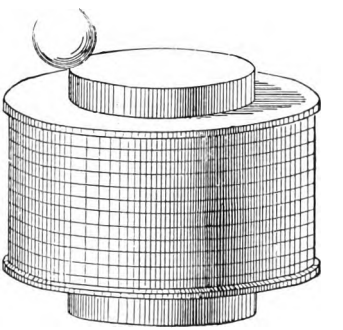


Fig. 67.

Wie deshalb ein grösseres Bestreben der Kraftlinien vorhanden ist, vom inneren Rande des einen Poles zum inneren Rande des anderen zu fliessen, und weniger das Bestreben vorliegt, von dem äusseren Rande des einen zum äusseren Rande des anderen Poles überzutreten, so muss auch die stärkste Zugkraft an den inneren Rändern des Poles herrschen. Wenn man die eiserne Kugel an irgend eine Stelle des Poles bringt, so rollt sie sofort bis sie senkrecht über dem inneren Rande stehen bleibt.

Digitized by Google

Kapitel V.

Ausdehnung des Gesetzes des magnetischen Kreises auf Fälle der Anziehung eines Ankers aus der Entfernung. Berechnung der magnetischen Zerstreuung.

Wir kommen zur Betrachtung der Anziehung eines Magnetes auf ein Stück Eisen aus der Entfernung. Hier ist eine sehr verwickelte Frage zu lösen. Welches Gesetz gilt für die Kraftwirkung eines Magnetes oder Elektromagnetes in die Ferne? Der gewöhnlichen Art, diesen Gegenstand zu betrachten, muss ich einen Widerspruch entgegenstellen. In der Regel sagt man, dass die Kraft allein von dem Gesetz des Quadrates der Entfernung abhänge. In den akademischen Prüfungen erwartet man stets, dass dieses Gesetz genannt werde. Was bedeutet das Gesetz des Quadrates? Es ist die Festlegung der Thatsache, dass die Wirkung des Magnetes (oder wie auch einige sagen, des Poles) auf einen von ihm entfernten Punkt sich umgekehrt ändert wie das Quadrat des Abstandes vom Pole. In der Entfernung von 1 Centimeter vom Pole herrscht eine gewisse Wirkung. Verdoppeln wir die Entfernung, so ist das Quadrat der Entfernung vier und die Wirkung wird also den vierten Theil betragen; in einer dreimal so grossen Entfernung beträgt die Wirkung nur den neunten Theil und so weiter. Stellt man mit einem Elektromagnet, oder vielmehr mit irgend einem beliebigen Magnet Versuche an, so wird man, falls nicht gerade ein günstiger Zufall mitwirkt, das Gesetz im Allgemeinen nicht zutreffend finden. Coulomb, der das Gesetz des Quadrates mit Hülfe seiner Torsionswage bestätigt haben soll, arbeitete mit langen dünnen Nadeln aus besonders hartem Stahl, die sorgfälltig magnetisirt waren, so dass die Zerstreuung des Magnetismus von dem Magnet so viel als möglich der Zerstreuung in radialen Büscheln an den Enden gleichkam. Er arbeitete praktisch mit Punktpolen. Wenn der Flächenmagnetismus nur an den Endflächen herrscht, so treten die magnetischen Linien wie Strahlen von einem Mittelpunkte in

Digitized by Google

radialen Linien aus. Nun ist das Gesetz des Quadrates sonst nirgends anwendbar als bei der Wirkung von Punkten; es ist ein Punktgesetz. Es ist eine lebhafte Erörterung darüber entstanden, ob der Schall, oder vielmehr die Stärke desselben, sich wie das Quadrat der Entfernung ändere; aber es scheint, dass die auf beiden Seiten Streitenden nicht wussten, was eigentlich mit dem Gesetz der umgekehrten Quadrate gemeint sei. Ebenso habe ich von Jemand, der für eine hervorragende Autorität auf dem Gebiete der Lehre vom Sehen gehalten wird, die Behauptung vernommen, dass die Stärke der Farbe eines scharlachrothen Geraniums sich umgekehrt mit dem Quadrate der Entfernung ändere, aus der man die Farbe betrachtet. Unzutreffenderes ist niemals behauptet worden. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate, ein vollkommen richtiges mathematisches Gesetz, trifft nicht allein für Elektricität, auch für Licht, für Schall und für jede beliebige Sache zu, vorausgesetzt, dass es nur auf den einen geeigneten Fall angewendet wird, auf den es anwendbar ist. Das Gesetz drückt die Art aus, in der die Wirkung bei der Entfernung abnimmt, wenn der Gegenstand, von dem die Wirkung ausgeht, so klein im Vergleich mit der in Rede stehenden Entfernung ist, dass er als ein Punkt angesehen werden kann. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate ist also das allgemeine Gesetz für die von einem Punkt ausgehende Wirkung. Die Musik eines Orchesters ist in einer Entfernung von 5 Meter nicht viermal so laut wie in einer Entfernung von 10 Meter; denn die Fläche eines Orchesters kann nicht als ein Puukt im Vergleich mit den genannten Entfernungen angesehen werden. Stellen wir uns einen Gegenstand vor, der einen Ton gibt und so klein im Verhältniss zur Entfernung ist, in der wir uns von ihm befinden, dass er ein Punkt ist. Dann ist für den Punkt das Gesetz der umgekehrten Quadrate richtig, nicht für die Stärke unseres Hörens, sondern für die Stärke dessen, nach dem unsere Empfindung gerichtet ist. Wenn die magnetische Wirkung von einem Gegenstand ausgeht, der so klein ist, dass er im Vergleich mit der Entfernung als Punkt betrachtet werden darf, so ist das Gesetz der umgekehrten Quadrate unbedingt und mathematisch richtig. Könnte man einen Elektromagnet oder einen Magnet mit so kleinen Polen im Verhältniss zu seiner Länge herstellen, dass die Endfläche desselben als einzige Stelle anzusehen ist, durch die magnetische Linien in die Luft treten, und sind die Enden noch so klein, dass sie verhältnissmässig

Digitized by Google

nur als Punkte erscheinen, sind die Endflächen als soweit entfernt von irgend einem Gegenstand, auf den sie wirken sollen, zu betrachten, dass der Abstand zwischen ihnen, verglichen mit ihren Querschnitten gross ist, kann man das Ende selbst als Punkt annehmen, dann allein ist das Gesetz der umgekehrten Quadrate richtig. Bei Elektromagneten haben wir es mit Eisenstücken zu thun, die in Hinsicht auf ihren Querschnitt nicht besonders lang sind, und die in der Regel runde oder quadratische, dem Anker nahe liegende Endflächen von bestimmter Grösse besitzen. Die Endflächen sind nicht so weit entfernt, dass die Polfläche im Vergleich zu dem Abstande von dem Punkte, auf den sie wirkt, als ein Punkt betrachtet werden könnte. Ueberdies gibt es bei Elektromagneten immer eine seitliche Zerstreuung; die magnetischen Kraftlinien treten nicht sämmtlich vom Eisen durch die Endflächen aus. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate ist deshalb in diesen Falle nicht anwendbar. Vor Anwendung des Gesetzes der Quadrate ist zuerst der Begriff des Poles zu bestimmen. Findet eine Zerstreuung über einen grossen Bereich statt, so ist jeder Teil des Bereiches polar. Das Wort polar drückt aus, dass an der beliebigen Stelle auf der Oberfläche des Magnetes Eisenfeilspähne anhaften. Wenn auf einer beträchtlichen Strecke Eisenfeilspähne nach der Mitte zu anhaften, so muss dieser Bereich als polar angesehen werden, an einigen Stellen jedoch stärker als an anderen. Es gibt Fälle, in denen man sagen kann, die polare Vertheilung ist derart, dass der durch die Oberfläche sich zerstreuende Magnetismus wirkt, als ob nicht am Ende, sondern etwa von demselben entfernt ein magnetischer Schwerpunkt vorhanden sei. Aber Fälle, in denen man eine derartige Vertheilung annehmen kann, dass ein magnetischer Schwerpunkt vorliegt, sind sehr selten. Als Gauss seine magnetischen Erdmessungen anstellte, um eine Darstellung des Erdmagnetismus zu geben, fand er es durchaus unmöglich, einen bestimmten Schwerpunkt für die beobachtete Vertheilung von Magnetismus über der nördlichen Region der Erde zu bezeichnen, weil es in der That für die ganze Erde einen bestimmten Pol in jenem Sinne nicht gab. Ebenso wenig trifft dies für unsere Magnete zu. Es gibt eine Polargegend, aber keinen Pol; wenn es nun keinen Schwerpunkt für den Oberflächenmagnetismus gibt, den man Pol nennen und von dem aus man Abstände messen könnte, wie kann man vom Gesetz der umgekehrten Quadrate sprechen? Der in der Fig. 68 abgebildete

Digitized by Google

Apparat ist der einzige, auf den meines Wissens nach das Gesetz der umgekehrten Quadrate anwendbar ist.

Er besteht aus einem langen, dünnen Stahlmagnet, der etwa 1 *m* lang und sehr sorgfältig magnetisirt ist, so dass er keine Zerstreuung bis dicht zum Ende besitzt. In Folge dessen kann man den Magnet für praktische Zwecke so betrachten, als ob er etwa 2,5 *cm* von seinen Enden entfernt Punktpole besitzt. Der Südpol befindet sich oben und der Nordpol unten. Letzterer liegt in einer Nuthe des mit einer Skala versehenen Grundbrettes, das in der Richtung Ost-West aufgestellt ist. Ich benutze also einen langen Magnet, und halte den Südpol entfernt, so dass er die Wirkung des Nordpoles nicht stören wird. Der dünne Nordpol ist als Punkt anzusehen. Ich betrachte die Wirkung dieses Punktes auf eine kleine Kompassnadel, die über einer Karte unter einem Glasgehäuse aufgehängt ist und ein kleines Magnetometer bildet. Ist der Apparat in einem von allen anderen Magneten freien Zimmer angeordnet und so aufgestellt, dass die Nadel nach Norden zeigt, was erhalten wir dann für eine Wirkung, sobald der Nordpol des langen Magnetes in einiger Entfernung östlich angebracht wird? Er wird das Nordende der Nadel abstossen und das Südende anziehen, also einen gewissen Ausschlag hervorrufen, den wir ablesen können. Die Kraft der Ablenkung wird mit Hülfe der Tangente des Anschlagswinkels berechnet. Rücken wir den Nordpol (als Punkt betrachtet) näher oder weiter ab und prüfen die Wirkung. Es sei der Abstand vom Pol bis zur Nadel halbirt worden, dann ist die ablenkende Kraft in der Hälfte der Entfernung viermal so gross; die Kraft in der doppelten Entfernung ist ein Viertel so gross. Es trifft dies zu, weil wir erstens einen Fall haben, in dem der Abstand im Vergleich zum Querschnitt des Poles sehr gross ist; weil zweitens der Pol praktisch auf einen Punkt zusammengedrängt ist; weil drittens nur ein Pol wirksam ist; und weil viertens der Magnet aus hartem Stahl

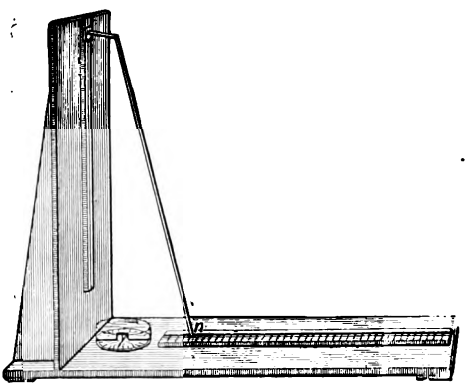


Fig. 68

Digitized by Google

besteht und sein Magnetismus in keiner Weise von dem Gegenstand, auf den er wirkt, abhängt, sondern constant ist. Es ist mit Sorgfalt eine solche Anordnung getroffen worden, dass der andere Pol in der Richtung der Drehungsachse der Nadel sich befindet, so dass eine Wirkung auf die Nadel keine Horizontalcomponente besitzt. Der Apparat ist so eingerichtet, dass, wie auch die Lage des Nordpoles ist, der Südpol, der an einer Führung senkrecht auf- und abgleitet, in senkrechter Ebene über der Nadel liegt und deshalb nicht das Bestreben hat, die Nadel in irgend einer Richtung herumzudrehen. Mit diesem Apparat kann man annähernd das Gesetz der umgekehrten Quadrate beweisen. Aber es kann kein Vergleich mit einem Elektromagnet gezogen werden, der in der Praxis verwendet wird. Wir können lange und dünne Elektromagnete nicht mit Punktpolen herstellen, die weit entfernt von der Stelle sind, auf die sie einwirken sollen; wir brauchen Magnete mit grossen, nahe am Anker liegenden Flächen.

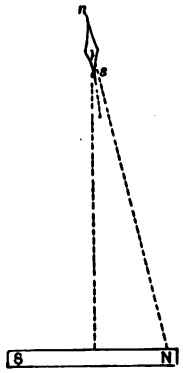


Fig. 69.

Noch aus einem anderen Falle geht hervor, dass die Anziehung nicht dem Gesetz der umgekehrten Quadrate folgt. Wir nehmen einen Stabmagnet, nicht zu lang, und nähern ihn breitseits einer kleinen Kompassnadel, Fig. 69. Sobald der Magnet der Kompassnadel nahe kommt, dreht sie sich herum. Hat man jemals gefunden, dass die Wirkung umgekehrt proportional dem Abstande (gerechnet von der Mitte der Nadel bis zur Mitte des Magnetes) ist, dass also die Ablenkungen umkehrt sich ändern wie die Quadrate der Abstände? Man findet dies keineswegs. Hält man den Stabmagnet mit der Längsseite zur Nadel, so ändern sich die Ausschläge umgekehrt wie die Kuben, nicht wie die Quadrate der Entfernungen.

Wirkt ein Elektromagnet auf seinen Anker aus der Entfernung, ist es möglich, das Gesetz in jener irreführenden Weise festzustellen? Die Anziehung des Elektromagnetes auf seinen Anker ist nicht proportional der Entfernung, noch dem Quadrate der Entfernung, noch der dritten oder vierten Potenz der Entfernung, noch der Quadrat-, noch der Wurzel mit dem Exponenten $^3/_2$, noch irgend einer anderen Potenz der Entfernung, sei es direct oder umgekehrt. Denn wir finden, dass mit der Entfernung sich auch Anderes ändert. Wären die Pole immer von derselben

Digitized by Google

Stärke, wirkten sie nicht gegenseitig auf einander, würden sie nicht durch den Zwischenabstand beeinflusst, so könnte ein solches Gesetz schon eher aufgestellt werden. Könnten wir, wie man früher gewohnt war, sagen „an diesem Pol“ oder „an diesem Punkte“ sind so und so viele Einheiten Magnetismus und an dieser anderen Stelle so und so viele Einheiten vorhanden, die aufeinander wirken, so liesse sich die Kraft mittels des Gesetzes der umgekehrten Quadrate berechnen. Das Gesetz entspricht indessen nicht den Thatsachen, weil die Pole keine Punkte sind und weil die Menge des Magnetismus an denselben keine ein für alle Mal bestimmte ist. Sobald der eiserne Anker dem Pole des Elektromagnetes genähert wird, entsteht eine wechselseitige Zwischenwirkung; es treten mehr magnetische Kraftlinien aus dem Pole als vorher, weil die Strö..ung der magnetischen Linien in Eisen leichter als in der Luft stattfindet. Wir wollen die Wirkung näher betrachten, wenn in den magnetischen Kreis eines Elektromagnetes eine Luftschicht gebracht wird. Die Figur 70 stellt einen geschlossenen magnetischen Kreis dar, der aus einem ungetrennten eisernen Ring besteht. Der einzige Widerstand im Wege der magnetischen Kraftlinien ist der des Eisens. Dieser Widerstand ist, wie wir wissen, klein.

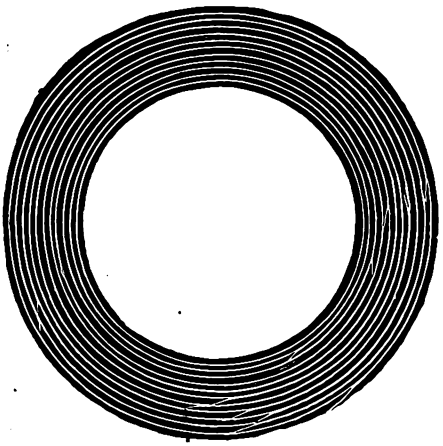


Fig. 70.

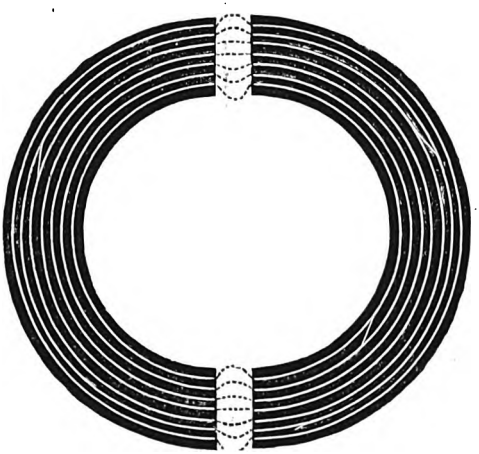


Fig. 71.

Vergleichen wir die Fig. 70 mit Fig. 71, die einen getheilten Ring mit Luftzwischenräumen zwischen den zerschnittenen Enden darstellt. Luft ist ein weniger durchlässiges Mittel für magnetische

Digitized by Google

Kraftlinien als Eisen; sie bietet einen grösseren magnetischen Widerstand für die Kraftlinien. Die magnetische Durchlässigkeit des Eisens ändert sich, sowohl mit seinen Eigenschaften als auch mit dem Grade magnetischer Sättigung. Die Tafel Seite 68 zeigt, dass das Eisen bei hohem Grade der Magnetisirung 16000 magnetische Kraftlinien für das *qcm* aufnimmt, so dass die Durchlässigkeit ungefähr 320 beträgt, Eisen leitet in diesem Zustande die magnetischen Kraftlinien 320 Mal besser als Luft; oder Luft bietet 320 Mal so grossen Widerstand für die magnetischen Kraftlinien als Eisen (bei jenem Sättigungsgrade). Es ist demnach der Widerstand in den Zwischenräumen gegen die Magnetisirung 320 Mal so gross, als er es gewesen sein würde, wenn die Zwischenräume mit Eisen ausgefüllt gewesen wären. Wird die nämliche magnetisirende Spule mit der nämlichen Batterie benutzt, so wird die Enführung von Luftzwischenräumen in den magnetischen Kreis zunächst die Wirkung haben, dass die Zahl der den Kreis durchsetzenden Kraftlinien sich vermindert. Diese erste Wirkung ruft eine zweite hervor. Es treten weniger Kraftlinien durch das Eisen.

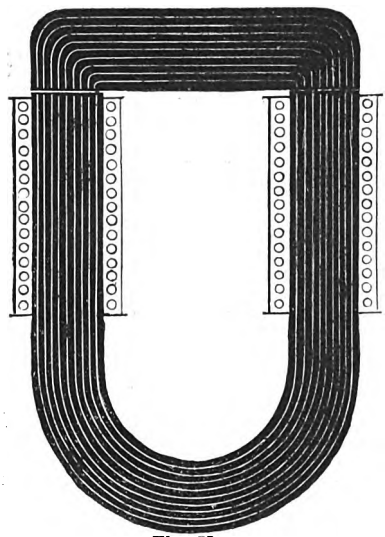


Fig. 72.

Wenn vorher 16 000 magnetische Kraftlinien auf das *qcm* entfielen, so werden nunmehr weniger — nehmen mit etwa 12 000 an — hindurchtreten. Die Tafel Seite 68 ergibt, dass, wenn B=1200 ist, die Durchlässigkeit des Eisens nicht 320, sondern etwa 1400 ist. Das heisst in diesem Zustande, wenn die Magnetisirung des Eisens nur so weit gesteigert wurde, ist der magnetische Widerstand der Luft 14 000 Mal grösser als der des Eisens, so dass alsdann eine verhältnissmässig weit grössere Beeinträchtigung des magnetischen Kreises in Folge des durch die Luftzwischenräume gebotenen Widerstandes stattfindet.

Wir wenden dies auf einen Elektromagnet an. Die Figur 72 stellt einen Hufeneisenmagnet dar, der mit einem Anker von gleichem Querschnitt in Berührung sich befindet. Aus dem Quer-

Digitized by Google

schnitt, der Länge des Eisens und mit Hülfe der Tafel der Durchlässigkeit lässt sich berechnen, welche Zahl von Ampère-Windungen Erregung eine bestimmte Anziehung hervorruft. Derselbe Elektromagnet ist in der Figur 73 dargestellt, aber mit einem kleinen Luftzwischenraum zwischen dem Anker und den Polflächen. Der gleiche Strom wird nicht so viel Magnetismus als vorher hervorrufen, weil Luftzwischenräume in den Kreis gebracht worden sind. Durch die Zufügung von Widerstand wird die Zahl der magnetischen Kraftlinien vermindert werden. Wir wollen die Erklärung auf die alte Weise durch den Begriff der Pole versuchen. Der Elektromagnet besitzt zwei Pole, diese erregen inducirte Pole an den gegenüberliegenden Flächen des Ankers. Verdoppelt man den Abstand vom Pole zum Eisen, so wird die magnetische Kraft (immer die Pole als blosse Punkte vorausgesetzt) nur ein Viertel sein; daher wird der inducirte Pol am Anker nur ein Viertel der Stärke besitzen. Der Pol des Elektromagnetes selbst ist aber schon schwächer. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate gibt uns nun nicht den geringsten Anhalt für diese sehr wichtige Thatsache. Wenn wir nicht wissen, um wie viel schwächer der primäre Pol ist, so lässt sich auch nicht sagen, um wie viel schwächer der inducirte Pol sein wird; denn der letztere hängt vom ersteren ab. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate führt in solchen Fällen demnach durchaus irre.

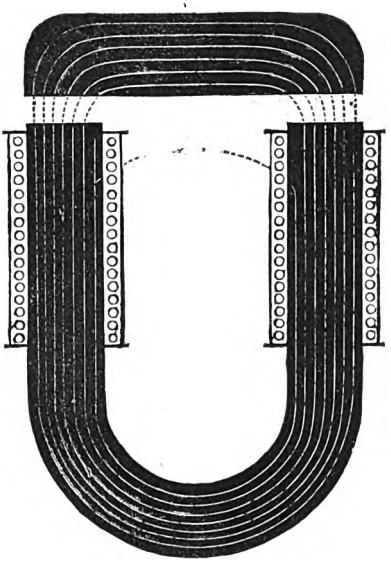


Fig. 73.

Uebrigens kommt noch eine dritte Wirkung hinzu. Durch die Herstellung eines Luftzwischenraumes drücken wir nicht allein den Magnetismus herunter, sondern wir haben auch eine neue Erwägung bei der Berechnung anzustellen. Weil die magnetischen Kraftlinien, wenn sie durch einen Luftzwischenraum, dann durch den Anker und durch den Luftzwischenraum am anderen Ende des Ankers treten, einem beträchtlichen Widerstand begegnen, so werden nicht sämmtliche Kraftlinien diesen Weg gehen; ein Theil

Digitized by Google

wird einen etwas kürzeren Weg nehmen, und wenn es sogar durch die Luft sein sollte. Es tritt einige Zerstreuung quer von Schenkel zu Schenkel ein. Es ist nicht gesagt, dass unter anderen Umständen niemals Zerstreuung eintritt, sogar bei einem Anker mit augenscheinlicher Berührung findet sich immer ein gewisser Betrag seitlicher Zerstreuung, die von der Innigkeit der Berührung abhängt. Erweitert man die Luftzwischenräume noch mehr, so entsteht noch mehr Widerstand auf dem Wege und noch weniger Magnetismus sowie noch mehr Zerstreuung. Die Figur 74 zeigt annähernd diesen anderweiten Zustand.

Der Anker wird weniger stark angezogen werden, ersteus, weil der erhöhte Widerstand den Strom magnetischer Kraftlinien vermindert, so dass eine geringere Zahl in dem magnetischen Kreise vorhanden ist, und zweitens, weil wegen der vermehrten Zerstreuung der geringeren Zahl nur ein Theil den Anker erreicht. Entfernt man den Anker, so bleiben als einzige magnetische Kraftlinien diejenigen, die in Folge Zerstreuung quer durch die Luft von einem Schenkel zum anderen gehen, wie in der Figur 75 dargestellt ist.

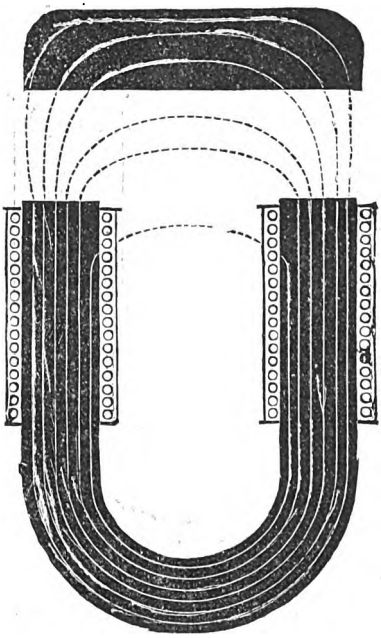


Fig. 74.

Zerstreuung quer von Schenkel zu Schenkel bedeutet immer einen Verlust magnetischer Kraftlinien, insoweit als nützliche Zwecke in Frage kommen (Fig. 75). Um die Wirkung kennen zu lernen, die bei der Einführung eines Abstandes zwischen Anker und Magnet eintritt, muss man demnach die Zerstreuung in Rechnung ziehen. Die Berechnung der Zerstreuung ist aber nicht leicht. Es kommt dabei so manches in Betracht, dass es nicht leicht wird, das Richtige zu wählen und das Unrichtige auszuscheiden. Zunächst ist der Versuch der beste Führer.

Bei der Erörterung der Zerstreuung soll daher auf einige von Sturgeon angestellte Versuche Bezug genommen werden.

Digitized by Google

Sturgeon benutzte einen aus einem Flintenlauf hergestellten, mit einer Wickelung versehenen Elektromagnet. Ungefähr ein drittel Meter entfernt brachte er eine Kompassnadel an und beobachtete die Wirkung. Die Kompassnadel wurde etwa 23° abgelenkt. Dann nahm er einen Eisenstab von gleicher Länge und steckte ihn in das Ende des Laufes. Wenn nur das Ende eingeführt wurde, wuchs die Ablenkung von 23° auf 37°; wenn aber das Eisen ganz in den Flintenlauf hinein geschoben war, verminderte sich die Ablenkung bis auf nahezu 23°. Er hatte bei dem Versuche die Möglichkeit der Zerstreuung erhöht, als der eiserne Kern verlängert wurde. Wenn er den Stab ganz in den Lauf hineinschob, konnte die weitergehende Zerstreuung, die von der vorher zugefügten Fläche herrührte, nicht auftreten. Es war aber doch eine vergrösserte Querschnittsfläche vorhanden. Der vermehrte Querschnitt ist aber praktisch von keinem Werthe. Wir müssen den Magnetismus durch etwa einen halben Meter Luft treiben, die 300 bis 1000 mal mehr Widerstand bietet als Eisen. Es muss also der Luftzwischenraum verringert werden; dies erfolgt aber nicht durch das Hineinbringen eines Kernes in das Rohr.

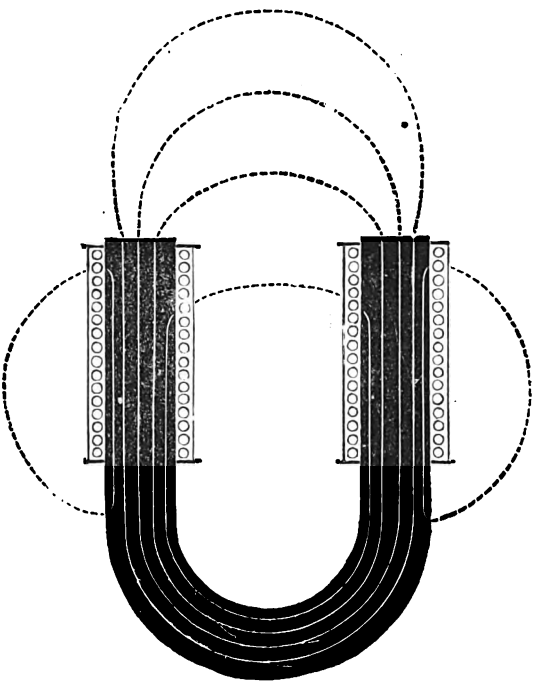


Fig. 75.

Untersuchung der Zerstreuung.

Zum eingehenden Studium der Frage der Zerstreuung und der Beziehung zwischen Zerstreuung und Anziehung habe ich einen besonderen Versuch angeordnet. In der Fig. 76 ist ein

Digitized by Google

Hufeisenmagnet dargestellt, dessen Kern aus weichem bearbeiteten Eisen besteht und von einer bekannten Zahl Drahtumwindungen umgeben ist. Der Magnet ist mit einem Anker versehen. Es sind ferner drei Untersuchungsspulen vorhanden, deren jede aus fünf Drahtwindungen besteht. Die Windung *C* befindet sich unten, die andere, *B*, ist um einen Pol dicht am Anker gewickelt, die dritte *A* liegt in der Mitte des Ankers. Die Windungen sollen Aufschluss geben, wie viel Magnetismus vom Anker aufgenommen wird. Wenn der Anker weit entfernt ist, so findet grosse Zerstreuung statt. Die Spule *C* soll alle Kraftlinien, die durch das Eisen gehen, aufnehmen. Die Spule *B* an den Polen hat alle Kraftlinien aufzunehmen, die nicht durch die Aussenseite verloren gehen, bevor der Magnetismus über die Berührungsfläche zwischen Pol und Anker übergetreten ist, während die Spule *A* alle Kraftlinien aufnimmt, die thatsächlich in den Anker treten und ihn anziehen. Mit Hülfe des ballistischen Galvanometers und der drei Prüfungsspulen lässt sich bestimmen, wie viel Magnetismus vom Anker bei verschiedenen Abständen desselben von den Polen aufgenommen wird. Auf diese Weise lässt sich die Zerstreuung bestimmen und die Beträge lassen sich mit den angestellten Berechnungen, sowie mit den Anziehungen in verschiedenen Abständen vergleichen. Der in den Anker gelangende Betrag von Magnetismus ergibt sich nicht nach dem Gesetz des umgekehrten Quadrates, sondern nach ganz anderen Gesetzen, die nur als besondere Fälle des Gesetzes des magnetischen Stromkreises ausgedrückt werden können. Das wichtigste Element der Berechnungen bildet in vielen Fällen der zulässige Prozentbetrag der Zerstreuung. Von der Grösse dieses Betrages werden wir durch das Ergebniss der folgenden Versuche Kenntniss erlangen.

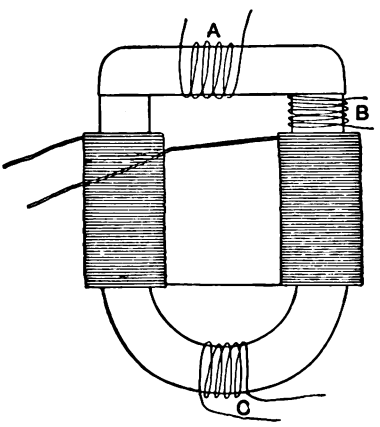


Fig 76.

Der benutzte Eisenkern hatte 13 *mm* im Durchmesser, die Wickelung besteht aus 178 Umwindungen. Der erste Ausschlag des Galvanometers beim Eintritt oder bei Unterbrechung des

Digitized by Google

Stromes gab ein Mass für die Zahl magnetischer Kraftlinien, die durch die in diesem Augenblick mit dem Galvanometer verbundene Prüfungswickelung traten oder aus derselben verschwanden. Die benutzten Ströme besassen eine Stärke von 0,7 bis 5,7 Ampère. Sechs Reihen von Untersuchungen wurden bei verschiedenen Abständen des Ankers angestellt. Die Ergebnisse sind in nachstehenden Tafeln enthalten.

I. Schwacher Strom (0,7 Ampère).

	A	*B*	*C*
Anker in Berührung.	12506	13870	14190
Ankerabstand 1 *mm* . . .	1552	2163	3786
Ankerabstand 2 *mm* . . .	1149	1487	2839
Ankerabstand 5 *mm* . . .	1014	1081	2028
Ankerabstand 10 *mm* . . .	676	1014	1690
Anker ganz entfernt.	—	675	1352

II. Stärkerer Strom (1,7 Ampère).

	A	*B*	*C*
Anker in Berührung.	18240	19590	20283
Ankerabstand 1 *mm* . . .	2570	3381	5408
Ankerabstand 2 *mm* . . .	2366	2839	5073
Ankerabstand 5 *mm* . . .	1352	2299	5949
Ankerabstand 10 *mm* . . .	811	1352	3381
Anker ganz entfernt.	—	1308	3041

III. Noch stärkerer Strom (3,7 Ampère).

	A	*B*	*C*
Anker in Berührung.	20940	22280	22960
Ankerabstand 1 *mm* . . .	5610	7568	11831
Ankerabstand 2 *mm* . . .	4597	6722	9802
Ankerabstand 5 *mm* . . .	2569	3245	7436
Ankerabstand 10 *mm* . . .	1149	2704	7098
Anker ganz entfernt.	—	2366	6427

Digitized by Google

IV. Stärkster Strom (5,7 Ampère).

	A	*B*	*C*
Anker in Berührung .	21980	23660	24040
Ankerabstand 1 *mm* . . .	8110	10810	17220
Ankerabstand 2 *mm* . . .	5611	8464	15886
Ankerabstand 5 *mm* . . .	4056	5273	12627
Ankerabstand 10 *mm* . . .	2029	4057	10142
Anker ganz entfernt .	—	3581	6705

Diese Zahlen mögen als eine Art ziffermässige Darstellung der Thatsachen angesehen werden, die in Annäherung in den Figuren 72 bis 75 gezeichnet sind. Die Zahlen selbst, soweit sie sich auf die Messungen beziehen, die bei der Berührung (1) und mit einem Zwischenraum von 1 *mm* Breite gemacht worden sind, sind in Figur 77 graphisch dargestellt. Die drei Curven, *A*, *B* und *C*, geben die bei der Berührung von Kern und Anker angestellten Messungen und drei andere Curven, A_1, B_1 und C_1, die beim Ankerabstande von 1 *mm* ausgeführten Messungen wieder. Die punktirte Linie liefert die graphische Darstellung der Zahlen für die Spule *C* bei verschiedenen Strömen, wenn der Anker ganz entfernt war.

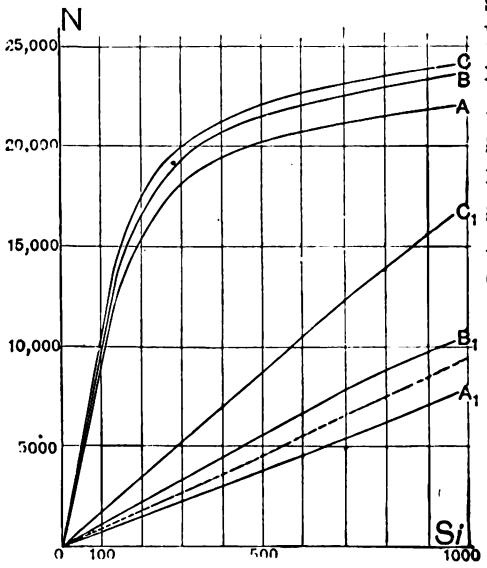


Fig. 77.

Bei der Prüfung der Zahlen im Einzelnen ersieht man, dass die grösste Zahl der in der Biegung des Eisenkernes durch die Spule *C* tretenden Kraftlinien 24040 war (wobei der Querschnitt etwas über 1 *qcm* betrug). Der Anker war hierbei in Berührung mit dem Elektromagnetkern. War der Anker ganz entfernt, so rief dieselbe magnetische Kraft nur 9795 Kraftlinien hervor. Ferner traten von den 24040 Kraftlinien 23660 (oder $98^1/_2{}^0/_0$) durch die polaren Berührungsflächen und von diesen wieder 21980

Digitized by Google

(oder $92^1/_2{}^0/_0$ der ganzen Zahl) gingen durch den Anker. Es war also Zerstreuung vorhanden, selbst wenn der Anker in Berührung war; sie betrug jedoch nur $7^1/_2{}^0/_0$. Wenn der Anker nicht mehr als 1 *mm* abgerückt wurde, so hatte das Vorhandensein des Luftzwischenraumes die erhebliche Wirkung, dass der ganze magnetische Strom auf ein Mal von 24040 auf 17220 ermässigt wurde Von dieser Zahl erreichten nur 10810 (oder $61^0/_0$) die Polfläche und nur 8110 (oder $47^0/_0$ der ganzen Zahl) gelang es durch den Anker hindurch zu treten. Die Zerstreuung betrug in diesem Falle $53^0/_0$. Bei einem 2 *mm* breiten Zwischenraum betrug die Zerstreuung $65^0/_0$, wenn der stärkste Strom benutzt wurde. Sie betrug $68^0/_0$ bei einem Zwischenraum von 5 *mm* und $80^0/_0$ bei einem Zwischenraum von 10 *mm*. Es möge noch bemerkt werden, dass, während ein Strom von 0,7 Ampère ausreicht, um 12506 Kraftlinien durch den Anker zu senden, wenn dieser in Berührung ist, es einem achtmal so starken Strom nur gelang 8110 Linien hindurch zu senden, sobald der Anker nur einen Millimeter von den Polflächen entfernt war.

Eine so starke Verminderung der magnetischen Strömung durch den Anker in Folge des vergrösserten Widerstandes und der vermehrten Zerstreuung tritt bei dem Vorhandensein der Luftzwischenräume ein; sie beweist, wie gross der durch die Luft bedingte Widerstand und wie wesentlich es ist, praktische Regeln für die Berechnung des Widerstandes und für die Veranschlagung der Zerstreuung zu besitzen, damit ein Anhalt für den Entwurf von Elektromagneten für eine gegebene Leistungsfähigkeit gewonnen werden kann.

Berechnung der Zerstreuung.

Die Berechnung des magnetischen Widerstandes bestimmter Theile eines gegebenen Materials ist verhältnissmässig leicht, und mit Hülfe der Formeln von Professer Forbes, die im Anhange enthalten sind, ist es in gewissen Fällen möglich, die Zerstreuung zu veranschlagen. Ich habe indessen gefunden, dass die Forbes'schen Regeln, die als Anhalt bei dem Entwurf von Dynamomaschinen dienen sollen, für gewöhnliche Fälle nicht recht bequem sind. Ich habe mich deshalb bemüht, eine etwas bequemere Art der Berechnung zu finden. Um den wahrscheinlichen Prozentsatz an Zerstreuung im Voraus zu bestimmen, muss man zunächst zwischen jenen Kraftlinien unterscheiden, die nutzbringend durch den Anker

Digitized by Google

gehen (und ihn anziehen helfen), und jenen, die sich in der umgebenden Luft zerstreuen und für die Anziehung verloren gehen.

Dann muss man die magnetische Leitungsfähigkeit oder *Durchlässigkeit* des Weges der nützlichen Kraftlinien, sowie diejenige der unzähligen Wege für die verlorenen Kraftlinien im Zerstreuungsgebiet kennen. Die Zahl der Kraftlinien, die durch den nützlichen und unnützen Weg gehen, ist proportional der Leitungsfähigkeit (oder Durchlässigkeit) der Wege, oder umgekehrt proportional den Widerständen der Wege. Es ist bei elektromagnetischen Berechnungen gebräuchlich, einen gewissen Coefficienten der gestatteten Zerstreuung, für den das Zeichen v dient, anzuwenden. Kennt man die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die durch den Anker gehen soll, so sind v mal so viel für den magnetischen Kern in Anschlag zu bringen. Wenn nun u die Durchlässigkeit des nützlichen Weges und w die Durchlässigkeit des nicht nutzbaren Weges im Zerstreuungsgebiet bedeutet, so wird der ganze Strom sich zum nützlichen Strom verhalten wie $u + w$ zu u. Es ist demnach der Coefficient der zulässigen Zerstreuung $v = \frac{u+w}{u}$.

Die einzige Schwierigkeit besteht in der Berechnung der Grösse u und w. Im Allgemeinen lässt sich die Grösse u leicht berechnen; sie ist das Reciproke der Summe aller magnetischen Widerstände im nützlichen Wege von Pol zu Pol.

Bei dem in den letztbeschriebenen Versuchen benutzten Elektromagnet waren drei Widerstände im nützlichen Wege vorhanden, der des Eisens im Magnet und Anker, sowie die der zwei Luftzwischenräume. Es lässt sich folgende Formel anwenden:

$$\text{Widerstand} = \frac{l_1}{A_1\ \mu_1} + \frac{2\ l_2}{A_2},$$

wenn die Angaben in Centimetermass gegeben sind. l mit dem Index 1 bezieht sich auf Eisen, l mit dem Index 2 auf Luft. Die Berechnung des Widerstandes (oder des Reciproken der Durchlässigkeit) für die nicht nutzbaren Kraftlinien des Zerstreuungsgebietes ist nicht so leicht, weil die Wege der magnetischen Kraftlinien sich aussergewöhnlich ausdehnen und die Linien sich in Curven von Pol zu Pol hinziehen.

Figur 78 liefert eine Darstellung der Ausbreitung der Kraftlinien im Zerstreuungsfelde zwischen den zwei Schenkeln eines aus Rundeisen gefertigten Elektromagnetes. Bei Eisen von quadratischem Querschnitt ist die Strömung ganz dieselbe, nur ist

Digitized by Google

sie an den Ecken des Metalls etwas dichter. Forbes' Regeln bringen in diesem Falle keinen Nutzen, wir bedürfen einer anderen Betrachtung des Gegenstandes.

Die Lösungen von Aufgaben über die Strömung der Wärme, der Elektrizität oder des Magnetismus im freien Raume gehören nicht zu den leichtesten geometrischen Uebungen. Es soll z. B. der Widerstand bestimmt werden, den eine unbegrenzte Flüssigkeit (etwa eine Lösung Kupfervitriol von bestimmter Dichte) bietet, wenn sie als Leiter elektrischer Ströme dient, die zwischen zwei unbegrenzt langen parallelen, kupfernen Cylindern fliessen. Die Figur 78 kann als Darstellung eines Querschnittes durch eine solche Anordnung angesehen werden. Die Curven stellen die Stromlinien dar. In einem so einfachen Falle ist es möglich, einen genauen Ausdruck für den Widerstand (oder für die Leitungsfähigkeit) einer Lage oder Schicht von der Einheit der Dicke zu finden. Er hängt von dem Durchmesser der Cylinder, von ihrem Abstande von einander und von der spezifischen Leitungsfähigkeit des Mittels ab. Er ist keineswegs proportional dem Abstande der Cylinder, während er in der That fast unabhängig von dem Abstande ist, wenn dieser grösser als der zwanzigfache Umfang eines der Cylinder ist. Er ist auch nicht einmal annähernd proportional dem Umfange der Cylinder, ausgenommen in jenen Fällen, in denen der kürzeste Abstand zwischen ihnen weniger als der zehnte Theil des Umfanges ist. Der Widerstand für die Längeneinheit der Cylinder wird durch die folgende Formel ausgedrückt:

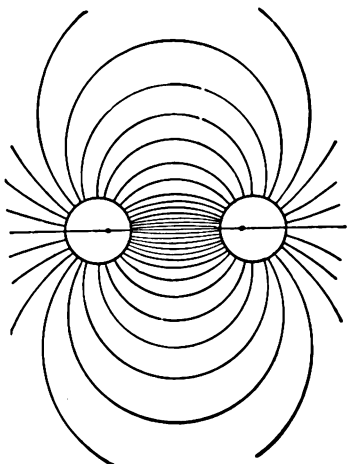


Fig. 78.

$$R = \frac{1}{\pi\mu} \text{ log. nat. } h, \qquad \text{wo } h = \frac{2a}{b + 2a - \sqrt{b^2 + 4ab}}.$$

Der Buchstabe a bedeutet den Radius des Cylinders, b ihren kleinsten Abstand, μ die Durchlässigkeit, oder bei elektrischen Strömen die spezifische Leitungsfähigkeit des Mittels.

Die Berechnung wird ausserordentlich vereinfacht, wenn wir nur eine Querschnittsschicht des Mittels von gegebener Dicke in

Digitized by Google

Betracht ziehen. Dann hängt der Widerstand zwischen den zwei Cylinderstückchen in dieser Schicht von dem Verhältniss des kürzesten Abstandes zum Umfang ab und ist von der absoluten Grösse des Systems unabhängig. Nimmt man zwei Cylinder von je einem Centimeter Umfang im Abstande eines Centimeters, so wird der Widerstand der sie umgebenden Flüssigkeitsschicht (von bestimmter Dicke) derselbe sein, als wenn sie ein Dezimeter Kreisumfang bei einem Dezimeter Abstand von einander besässen. Dieser Umstand vereinfacht die Sache sehr. Meinem Freunde und ehemaligen Hauptassistenten, Dr. R. Mullineux Walmsley, verdanke ich die nachstehende tabellarische Uebersicht der Widerstände innerhalb der Grenzen der gewöhnlich vorkommenden Verhältnisse.

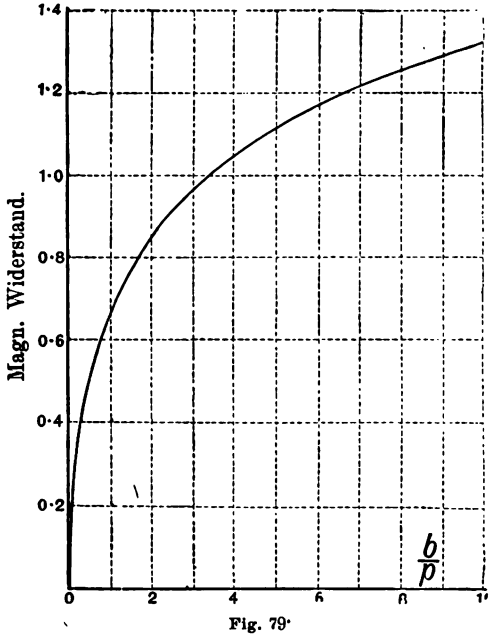


Fig. 79.

Die Zahlen der Spalten 1 und 2 der Tafel sind zur bequemeren Veranschaulichung in Fig. 79 graphisch eingetragen worden. Als Beispiel diene Folgen des: Gesucht werde der magnetische Widerstand und die magnetische Durchlässigkeit zwischen zwei parallelen Eisenkernen von 2,5 *cm* Durchmesser und 20 *cm* Länge; der kleinste Abstand zwischen den Kernen sei 6 *cm*. Hier ist $b = 6$, $p = 2{,}5 \times 3{,}14$; $\frac{b}{p} = 0{,}764$.

Die Tafel ergiebt (bei Anwendung der Interpolation), dass der Widerstand und die Durchlässigkeit für die Schichtdicke von einem *cm* 0,6021 und 1,664 beträgt. Für 20 *cm* Dicke würde man 0,030, bz. 33,28 erhalten.

Digitized by Google

Magnetischer Widerstand der Luft zwischen zwei parallelen cylindrischen Schenkeln von Eisen.

$\frac{b}{p}$ Verhältniss des kleinsten Abstandes zum Umfang.	Magnetischer Widerstand in C. G. S. Einheiten = die magnetomotorische Kraft oder die Ampèrewindungen dividirt durch die gesammte magnetische Strömung Schicht = 1 cm stark.	
	Widerstand	Durchlässigkeit
0,1	0,2461	4,063
0,2	0,3404	2,938
0,3	0,4084	2,449
0,4	0,4628	2,161
0,5	0,5084	1,967
0,6	0,5479	1,825
0,8	0,6140	1,629
1,0	0,6681	1,497
1,2	0,7144	1,400
1,4	0,7550	1,324
1,6	0,7903	1,265
1,8	0,8220	1,217
2,0	0,8511	1,202
4,0	1,0500	0,952
6,0	1,1710	0,854
8,0	1,2624	0,792
10,0	1,3250	0,755

Anmerkung: In der vorstehenden Tafel ist die Längeneinheit des Cylinders (1 *cm* für die Spalten 2 u. 3) vorausgesetzt; die Strömung der magnetischen Kraftlinien ist für eine Schicht von unbegrenzter Ausdehnung und von einem Centimeter Dicke berechnet. Bezeichnung: p = Umfang des Cylinders; b = kürzester Abstand zwischen den Cylindern. In den Spalten 2 und 3 ist die Einheit des Widerstandes diejenige von 1 *ccm* Luft.

Wenn die Durchlässigkeit zwischen den beiden Schenkeln in dieser Weise annäherungweise berechnet ist, so wird die nicht nutzbare Strömung durch den Zwischenraum durch Vervielfachung der so gefundenen Durchlässigkeit mit dem mittleren Werthe der magnetischen Potentialdifferenz zwischen den zwei Schenkeln erhalten; letztere kann — wenn das die Schenkel an ihrem unteren Ende vereinigende Joch aus gutem massiven Eisen besteht, und wenn die parallelen Kerne beim Vergleich des Widerstandes des nützlichen Weges mit demjenigen des Zerstreuungs-

Digitized by Google

gebietes einen geringen magnetischen Widerstand bieten — einfach als die Hälfte der Ampère-Windungen, multiplizirt mit 1,2566 genommen werden.

Die hier angewendete Methode zur Berechnung des Widerstandes des Zerstreuungsfeldes ist demnach nur eine annähernde, denn es wird vorausgesetzt, dass die Zerstreuung nur in den Ebenen der betrachteten Schicht stattfindet. Thatsächlich findet aber ausserhalb dieser Ebenen überall etwas Zerstreuung statt. Der wirkliche Widerstand ist mithin immer etwas kleiner, dagegen die Durchlässigkeit immer etwas grösser als der aus der Tafel berechnete Werth.

Bei den in den gewöhnlichen Telegraphenapparaten benutzten Elektromagneten ist das Verhältniss von b zu p in der Regel nicht sehr von der Einheit abweichend, so dass für sie die Durchlässigkeit quer von Schenkel zu Schenkel auf das Centimeter Länge des Kernes nicht wesentlich von 1,5 sich unterscheidet oder nahezu das Doppelte der Durchlässigkeit von einem Kubikcentimeter Luft beträgt.

Anwendung auf besondere Fälle.

Wir sind nun in der Lage, den Grund für eine von Du Moncel aufgestellte sonderbare Behauptung zu finden. Moncel will gefunden haben, dass bei einem Abstande von 1 *mm* die Anziehung eines zweipoligen Elektromagnetes auf seinen Anker geringer war, wenn der Anker von der Seite genähert wurde, als wenn der Anker den Polenden unmittelbar gegenüber gebracht wurde, und zwar in dem Verhältniss von 19 zu 31. An der in Frage kommenden Textstelle seiner Darstellung hat er aber nicht näher dargelegt, von welcher Gestalt der Anker oder die Kerne waren. Setzen wir voraus, dass er einen Elektromagnet mit Kernen von gewöhnlicher Art — von rundem Eisen mit ebenen Enden, vermuthlich einen solchen Elektromagnet wie in Fig. 23 abgebildet — untersuchte, so ist augenscheinlich, dass entsprechend der cylinderischen Rundung des Kernes, die Luftzwischenräume, wenn der Anker seitwärts genähert wird, grösser sind, als wenn der Anker in der gewöhnlichen Weise den Polenden gegenüber gebracht wird. Sofern bei gleich bemessenem Abstande der Widerstand im Kreise grösser ist, so wird die magnetische Strömung und die Anziehung kleiner sein.

Digitized by Google

Es muss nun auch einleuchten, weshalb ein Anker aus Eisen von flachem rechteckigen Querschnitte, obschon er in der Berührung fester haftet, wenn er auf dem Rande hochkant steht, in der Entfernung kräftiger angezogen wird, wenn er mit der flachen Seite den Polen genähert wird. Die Luftzwischenräume bieten (bei dem nämlichen kleinsten Abstande) einen geringeren magnetischen Widerstand, wenn der Anker mit der flachen Seite den Polen gegenüber gebracht wird.

Ein anderer Punkt wird ebenfalls erklärlich, nämlich die Beobachtung von Lenz, Barlow und anderen, dass der grösste Betrag an Magnetismus, der langen eisernen Stäben durch einen gegebenen elektrischen Strom mitgetheilt werden konnte, nicht dem Querschnitt des Eisens proportional, sondern nahezu proportional seiner Oberfläche sei. Die Erklärung hierfür ist folgende. Der magnetische Stromkreis war ein schlechter, indem er aus einem geraden Stab Eisen und einem Rückweg durch die Luft bestand. Die magnetisirende Kraft war weniger zu dem Zwecke aufgewendet worden, um die magnetischen Kraftlinien durch das völlig durchlässige Eisen hindurch, sondern um die magnetischen Linien durch die sehr viel weniger durchlässige Luft zu treiben. Der magnetische Widerstand des Rückweges durch die Luft ist aber — wenn die Entfernung von einem zum anderen äussersten Ende des Stabes im Verhältniss zu seinem Umfange gross ist — nahezu letzterem proportional, d. h. proportional der dargebotenen Oberfläche.

Eine andere Ansicht hierüber hatte Professor Müller. Er behauptete, dass bei Eisenstäben von gleicher Länge, die von der gleichen magnetisirenden Kraft erregt werden, der Betrag an Magnetismus proportional der Quadratwurzel des Umfanges sei. Viele Mühe ist von Dub, Hankel, von Feilitzsch und anderen aufgewendet worden, um die Wahrheit jenes „Gesetzes“ darzuthun. Keiner der Versuchssteller scheint eingesehen zu haben, dass das, was den Betrag der magnetischen Strömung bestimmt, nicht das Eisen, sondern der Widerstand des Rückweges durch die Luft war.

Von Feilitzsch stellte Curven (Fig. 80) dar, aus denen er folgerte, dass das Gesetz von der Quadratwurzel aus dem Umfange bestätigt wäre. Die völlige Geradheit der Curven beweist, dass das Eisen in keinem Fall so stark magnetisirt worden war, um die nähernde Sättigung durch die Krümmung der Curven anzudeuten. Luft, nicht Eisen bot den Hauptbetrag des Widerstandes gegen die

Digitized by Google

Magnetisirung in allen jenen Versuchen. Ich folgere aus den Curven, dass die Magnetisirung nicht proportional der Quadratwurzel aus dem Umfange, sondern eher proportional dem Umfange selbst ist. In der That zeigen die Winkel, unter denen die den verschiedenen Umfängen entsprechenden Curven ansteigen, dass der Betrag an Magnetismus fast wie die Oberfläche wächst.

Man bemerke auch, dass hier kein geschlossener, magnetischer Kreis vorhanden ist, bei dem der Querschnitt in Rechnung kommt; wir haben es mit einem Stabe zu thun, in dem der Magnetismus von einem Ende zum anderen nur durch Zerstreuung rund herum in die Luft gelangen kann. Wenn deshalb der Widerstand des Luftweges von einem Ende des Stabes zum anderen umgekehrt proportional der Oberfläche ist, so werden wir Curven erhalten, die ganz ähnlich jenen sind. Das ist der genaue Vorgang. Bei einem Körper von einer gewissen gegebenen Form im Raum ist die Durchlässigkeit, die der Raum um jenen Körper (oder vielmehr das diesen erfüllende Medium) den ihn durchfliessenden magnetischen Linien bietet, praktisch genommen, proportional der Oberfläche. Besonders ist dies der Fall für geometrisch ähnlich gestaltete Körper, wenn sie verhältnissmässig klein im Vergleich zur Entfernung zwischen ihnen sind.

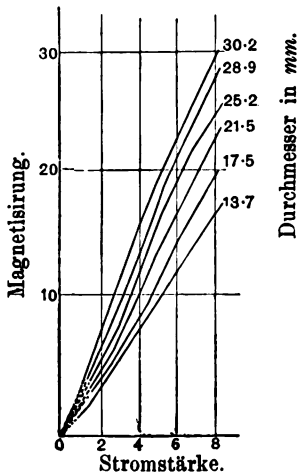


Fig. 80.

Elektriker wissen, dass der elektrische Widerstand der Flüssigkeit zwischen zwei kleinen Kugeln oder Scheiben aus Kupfer, die in ein grosses Bad von Kupfervitriol eintauchen, praktisch unabhängig von der Entfernung zwischen ihnen ist, vorausgesetzt, dass sie sich nicht in einem geringeren Abstande als dem zehnfachen Durchmesser von einander befinden Bei einem langen Stabe können wir die Entfernung zwischen den ausgestreckten Enden als ausreichend gross ansehen, um den Fall als eine Annäherung jenes bestätigten Gesetzes gelten zu lassen.

Von Feilitzsch's Stäbe waren indessen nicht so lang, dass der mittlere Werth der Länge des Weges von einer Endfläche zur anderen, entlang den magnetischen Kraftlinien unendlich gross im Vergleiche mit dem Umfange war. Daher die Abweichung von

Digitized by Google

der genauen Proportionalität der Oberfläche. Seine Stäbe waren 9,1 *cm* lang, und die Umfänge der sechs Stäbe waren 94,9; 90,7; 79,2; 67,6; 54,9 und 42,9 *mm*.

Unterschiede zwischen langen und kurzen Kernen.

Es herrschte lange die Anschauung, dass langschenkelige Elektromagnete eine grössere „ziehende" Kraft besässen als die kurzschenkeligen; dass also ein langschenkeliger Magnet einen Anker auf grössere Entfernung von seinen Polen anziehen könne als ein kurzschenkeliger mit Eisenkernen gleichen Querschnittes. Der Grund hierfür liegt nahe. Um die magnetischen Kraftlinien durch einen weiten Luftzwischenraum zu treiben, wird eine grosse magnetisirende Kraft wegen des grossen Widerstandes und der grossen Zerstreuung erforderlich. Die grosse magnetisirende Kraft kann aber mit kurzen Kernen nicht erreicht werden, weil bei kurzen Kernen keine genügende Länge Eisen vorhanden ist, das alle erforderlichen Drahtwindungen aufnimmt. Der lange Schenkel ist deshalb notwendig, damit er den für den erforderlichen Stromumlauf nöthigen Draht fassen kann.

Wir sehen nun, wie beim Entwerfen von Elektromagneten die Länge des Eisenkernes thatsächlich bestimmt wird; er muss lang genug sein, um die Bewickelung mit solchem Draht zu gestatten, der, ohne dass Ueberhitzung eintritt, die Ampèrewindungen des genügend starken Erregerstromes erträgt. Genügend stark ist der Erregerstrom, wenn er die erforderliche Anzahl magnetischer Kraftlinien (bei der zulässigen Zerstreuung) durch den Widerstand des nützlichen Weges treibt. Wir werden auf diesen Punkt zurückkommen, nachdem wir, wie es im nächsten Kapitel geschieht, die Methode bestimmt haben, nach der die erforderliche Drahtmenge zu berechnen ist.

Es giebt noch eine andere Art, in der der Unterschied im Verhalten zwischen langen und kurzen Magneten — d. h. von hufeisenförmigen — hervortritt. Schon 1840 fand Ritchie, dass es schwerer sei, Stahlmagnete (die mit Elektromagneten gestrichen werden) zu magnetisiren, wenn die Elektromagnete kurz sind, als wenn sie lang sind. Er verglich in Folge dessen Magnete mit einander, welche die gleiche anziehende Kraft besassen, d. h. vermuthlich denselben Eisenquerschnitt und den nämlichen Grad der Magnetisirung besassen. Dieser Unterschied zwischen langen und kurzen Kernen muss offenbar mittels desselben Grundgesetzes

Digitized by Google

erklärt werden, wie die grössere Kraftäusserung des langschenkeligen Magnetes. Um Magnetismus nicht nur durch einen Eisenbogen zu treiben, sondern auch durch dasjenige Mittel von geringer Durchlässigkeit, das sonst noch vorhanden ist, sei dies ein Luftzwischenraum oder ein Bogen harten Stahles, der etwas von seinem Magnetismus zurückbehalten wird, ist eine genügend grosse magnetomotorische Kraft nothwendig, die den gesammten Widerstand überwindet. Die dazu erforderlichen Drahtwindungen bedingen, dass der Kern eine gewisse Länge besitzt, um die Umwindungen aufzunehmen. Ritchie fand auch, dass der Betrag an magnetischem Rückstande in dem weichen Eisenbogen bei der ersten Wegnahme des Ankers nach der Abstellung des Stromes in langen Magneten etwas grösser als in kurzen war. Es stimmt mit den Eigenschaften des Eisens überein, dass lange Eisenstücke obschon weich, etwas mehr magnetischen Rückstand nach einer Magnetisirung zeigen, als kurze Eisenstücke. Später werden wir unsere Aufmerksamkeit dem Verhalten kurzer Eisenstücke, die keinen magnetischen Rückstand besitzen, zuwenden.

Fernere Versuchsangaben.

Mehrfach bin ich auf Versuchsergebnisse zurückgegangen, die hauptsächlich von deutschen und französischen Gelehrten in den letzten Jahren erlangt worden und nunmehr in wissenschaftlichen Zeitschriften begraben sind. Die zerstreuten Abhandlungen der deutschen Physiker zeigten sich zu oft als werthlos oder unverständlich wegen der Auslassung von Versuchsangaben. Es sind zweifelhafte Masse für die Stromstärken angegeben oder nicht geaichte Galvanometer benutzt; es fehlen Angaben über die Zahl der Umwindungen, oder die Ergebnisse sind in veralteten Ausdrücken ausgedrückt. Es ist grosse Neigung vorhanden, über das „magnetische Moment“ der Magnete Auskunft zu geben. Das magnetische Moment eines Elektromagnetes ist die einzige Grösse, die man nie zu kennen braucht, sie bildet eine nutzlose Angabe, abgesehen von dem Falle, in dem es sich um harte stählerne Stabmagnete handelt, die zur Bestimmung der horizontalen Stärke der erdmagnetischen Kraft benutzt werden. Von einem Elektromagnet muss man die Zahl magnetischer Kraftlinien kennen; die älteren Versuche gewähren aber selten die Mittel zur Bestimmung dieser Zahl. Nichtsdestoweniger findet man einige des Studiums werthe Untersuchungen, deren Erklärung gegeben werden soll.

Digitized by Google

Hohle Kerne im Gegensatz zu soliden Kernen.

Es sind nun einige Versuche von von Feilitzsch über die schwierige Frage der röhrenförmigen Kerne zu beschreiben. Dieser Gegenstand ist auch von Sturgeon, Pfaff, Joule, Nicklès und später von Du Moncel behandelt worden. Zur Prüfung der Frage, ob der innere Theil des Eisens auch Träger des Magnetismus sei, stellte von Feilitzsch einen Satz dünner eiserner Röhren her, die in einander geschoben werden konnten. Sie waren 11 *cm* lang und ihr Umfang schwankte zwischen 6,12 *cm* und 9,7 *cm*. Sie konnten in eine magnetisirende Spirale gesteckt werden, durch die sowohl schwache wie starke Ströme gesandt wurden. Die ablenkende Wirkung der Röhren auf eine Magnetnadel wurde vermerkt und durch einen Stahlmagnet ausgeglichen, aus dessen Lage die Kräfte und die magnetischen Momente berechnet wurden. Da die Röhren gleiche Länge besassen, so ist die Magnetisirung annähernd proportional dem magnetischen Moment. Die äusserste Röhre wurde zuerst in die Spirale gebracht, und eine Reihe von Beobachtungen angestellt; dann wurde die Röhre von nächst geringerem Querschnitt in die erste Röhre geschoben und eine andere Reihe von Beobachtungen angestellt. Darauf wurde eine dritte, vierte u. s. w. Röhre eingeschoben, bis alle sieben Röhren in Benutzung waren. Da bei allen Versuchen die äussere Röhre vorhanden war, so war der Widerstand des Luftrückweges in allen Fällen gleich. Die in Figur 81 dargestellten Curven zeigen die Ergebnisse.

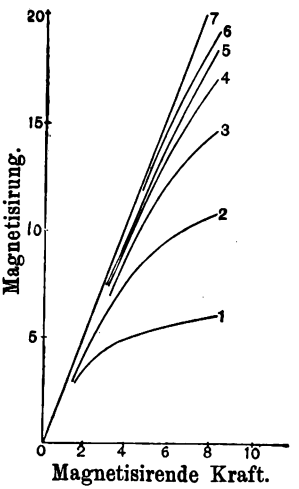


Fig. 81.

Die niedrigste Curve entspricht den Versuchen mit der ersten Röhre. Ihre Form (übergebogen und beinahe horizontal verlaufend), zeigt, dass bei grosser magnetisirender Kraft nahezu Sättigung eintritt. Die zweite Curve entspricht den Versuchen mit der ersten Röhre und der eingeschobenen zweiten. Bei grösserem Eisenquerschnitt tritt die Sättigung in einem späteren Stadium ein. Jede folgende Röhre vermehrte die Capazität zur Aufnahme magnetischer Linien; der Beginn der Sättigung ist kaum wahrnehmbar, sogar nicht bei der grössten magnetisirenden Kraft,

Digitized by Google

wenn alle sieben Röhren benutzt wurden. Alle Curven zeigen die nämliche anfängliche Steigung. Es beweist dies, dass bei kleinen magnetisirenden Kräften, wenn die geringste Menge Eisen vorhanden und das Eisen weit von der Sättigung entfernt ist, der Hauptwiderstand gegen die Magnetisirung im Luftwege liegt, und es dabei gleichgültig ist, ob der Gesammtquerschnitt des benutzten Eisens gross oder klein ist.

Wirkung der Gestalt des Querschnittes.

In soweit die Aufnahmefähigkeit für magnetische Kraftlinien in Frage kommt, ist die eine Gestalt des Kernquerschnittes so gut wie die andere; quadratische, rechteckige ist so gut wie runde Form, wenn nur die Querschnittsfläche gleich ist, und wenn es sich um geschlossene oder nahezu geschlossene magnetische Kreise handelt. Es gibt aber zwei andere Gründe, die beide zu Gunsten runder Kerne sprechen.

Die Zerstreuung magnetischer Kraftlinien von Kern zu Kern ist zunächst für gleiche mittlere Abstände proportional der Oberfläche des Kernes; der runde Kern bietet aber kleinere Oberfläche als der quadratische oder rechteckige Kern. Ueberdies befördern alle Ränder und Ecken die Zerstreuung. Ferner wird die Menge des Kupferdrahtes, die für jede Umwindung erforderlich ist, bei runden Kernen kleiner sein als für Kerne irgend einer anderen Gestalt, da von allen geometrischen Figuren gleichen Flächeninhaltes der Kreis die einzige von kleinstem Umfange ist.

Die früheren Versuche von von Waltenhofen beziehen sich auf einen Fall, in dem der magnetische Kreis nicht geschlossen ist, sondern in dem die magnetischen Kraftlinien im Gegentheil ihren Weg mittels Zerstreuung durch die Oberfläche des Kernes und durch die Luft von einem zum andern Pol finden müssen. In solchen Fällen ist bei niedrigen Graden der Sättigung die der Luft gebotene Oberfläche von grösserer Bedeutung als der innere Querschnitt.

Einige auf Seite 70 in dem Kapitel über die Eigenschaften des Eisens beschriebene Versuche stehen mit diesen Ergebnissen in Uebereinstimmung. Die weiteren Versuche von Bosanquet mit Ringen verschiedener Dicke sind in Bezug auf den in Rede stehenden Punkt entscheidend. Die Frage lässt sich deshalb ein für allemal mit folgender Bemerkung erledigen. In allen Fällen, in denen der magnetische Kreis geschlossen oder nahezu ge-

Digitized by Google

schlossen ist, wird die Anzahl magnetischer Kraftlinien, die durch eine gegebene magnetische Kraft erzeugt wird, proportional der Fläche des Eisenquerschnittes im Kerne sein und nicht von der Gestalt dieser Fläche abhängen; dagegen wird in allen anderen Fällen, in denen, wie bei Stabmagneten, die Durchlässigkeit des magnetischen Kreises wesentlich von dem Rückweg der magnetischen Kraftlinien durch die Luft abhängt, die von einer gegebenen magnetisirenden Kraft erzeugte magnetische Strömung zum geringsten Theile von dem Querschnitt des Eisens, sondern der Hauptsache nach von der Leichtigkeit abhängen, die das Eisen dem Austritt der magnetischen Kraftlinien in die Luft bietet. Deshalb wird die Strömung nahezu proportional der Oberfläche sein.

Wirkung des Abstandes der Pole.

Ein anderer Gegenstand der Versuche von Du Moncel, Dub, Nicklès und anderen war der Abstand der Pole. Dub war der Ansicht, dass es keinen Unterschied mache, wie weit die Pole von einander entfernt seien. Nicklès hatte eine besondere Anordnung getroffen, die ihm erlaubte, zwei aufrechtstehende, 9 *cm* hohe Kerne oder Schenkel auf einem massiven Joche von Eisen zu verschieben. Der Anker war 30 *cm* lang. Er fand, dass die Wirkung bei Benutzung schwacher Ströme im besten war, wenn der kürzeste Abstand der Pole 3 *cm* betrug — bei einem stärkeren Strome fand er 12 *cm* — und bei dem stärksten Strome nahezu 30 *cm*. Ich glaube, dass bei diesen Ergebnissen die Zerstreuung eine Rolle spielt. Du Moncel stellte verschiedene Versuche an, um diesen Gegenstand aufzuklären ebenso Professor Hughes in einer wichtigen, wenig bekannten Untersuchung, die in den „Annales télegraphiques“ im Jahre 1862 erschienen ist.

Untersuchungen von Professor Hughes.

Der Zweck bestand in der Ermittelung der besten Form des Elektromagnetes, des geeignetsten Abstandes der Pole und der besten Form des Ankers für rasche Arbeit des Drucktelegraphen. Die Zeichnung (Figur 82) zeigt die Form des Hughes'schen Elektromagnetes. Ein stählerner Dauermagnet, gewöhnlich ein Blättermagnet, besitzt Polansätze aus weichem Eisen und ein Paar Spulen auf den Polansätzen. Will man einen

Digitized by Google

schnell arbeitenden Magnet haben, so wird die schnellste Wirkung nicht durch Vertheilung der Windungen auf die ganze Länge gesichert, sondern dadurch, dass die Wickelungen soweit als thunlich nahe den Polen angehäuft werden.

Hughes stellte Versuche an, um die richtige Länge und Dicke jener Polansätze zu ermitteln. Er fand die Verwendung nicht zu dünner Polstücke vortheilhaft, weil andernfalls der Magnetismus des Dauermagnetes nicht ohne beträchtlichen Widerstand durch das Eisen hindurch geht, indem der ungenügende Querschnitt hemmend wirkt. Zu dicke Stücke dürfen ebenfalls nicht benutzt werden, weil sie zu viel Oberfläche für die Zerstreuung von einem Polstück zum anderen bieten. Schliesslich wurde als Länge etwa die sechsfache des Durchmessers (oder noch etwas mehr) ermittelt.

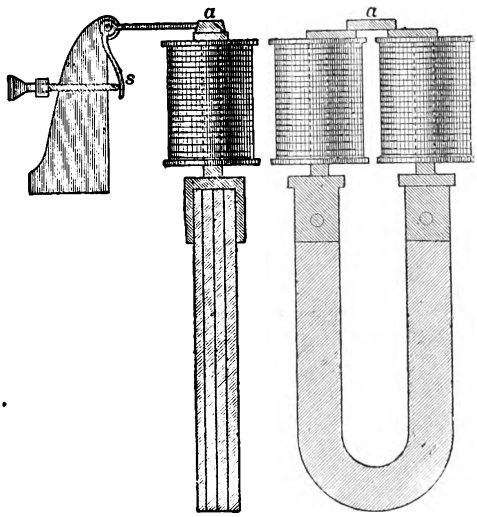


Fig. 82.

Zu weiteren Versuchen benutzte Hughes einen Magnet kürzerer Form, ähnlich der in Relais angewendeten Form, mit einem Anker von 2 bis 3 *mm* Dicke, 1 *cm* Breite und 5 *cm* Länge. Die Pole waren am oberen Ende gegen einander gebogen. Hughes suchte zu ermitteln, ob es von Vortheil sei, die Pole einander mehr zu nähern und einen Anker von der Länge von 5 *cm* anzuwenden. Er versuchte alle verschiedenen Arten und zeichnete die beobachteten Ergebnisse als Curven, die verglichen werden konnten. Der Zweck war die Feststellung der Bedingungen, unter denen die stärkste Anziehung statt fand, wenn Ströme einwirken, wie sie für den Betrieb des Drucktelegraphenapparates erforderlich sind und nur 1 bis zu 20 Hundertstel einer Sekunde dauern. Es zeigte sich von entschiedenem Vortheil, die Länge des Ankers so zu verkürzen, dass er nicht weit über die Pole reicht. Es wurde in der That ein ausreichender magnetischer Kreis geschaffen, der die erforderliche anziehende Kraft gewährte, ohne dass soviel Wahrscheinlichkeit für die Zerstreuung blieb,

Digitized by Google

wie es der Fall gewesen sein würde, wenn der Anker sich weiter über die Pole hin erstreckt hätte. Auch verschiedene Formen des Ankers mit sehr verschiedenen Querschnitten wurden versucht.

Lage und Form des Ankers.

In einer Abhandlung von Du Moncel über Elektromagnete[1]) ist eine Erörterung über Anker und über die besten Formen desselben für die Wirkung in verschiedenen Lagen enthalten. Unter anderem finden wir das Paradoxon, dass bei der Benutzung eines Hufeisenmagnetes mit flachen Polen und eines flachen Stückes aus weichem Eisen als Anker letzteres fester anhaftet, wenn es mit dem Rande angelegt ist, während andererseits, wenn die Wirkung in der Entfernung — durch die Luft — eintritt, die Anziehung grösser wird, falls der Anker mit der flachen Seite dem Magnet gegenübersteht. Der Vortheil der Verkleinerung der Berührungsfläche erklärt sich durch das Gesetz der Tragkraft, denn es kommt B^2 in Frage. Warum soll aber für die Wirkung in die Ferne grösserer Vortheil bestehen, wenn der Anker flach den Polen gegenüber liegt? Es erklärt sich dies dadurch, dass der durch den Luftzwischenraum bedingte Widerstand gegen die Strömung der magnetischen Kraftlinien verringert wird. Du Moncel untersuchte auch den Unterschied zwischen runden und flachen Ankern; er fand, dass runde Anker nur halb so stark wie prismatische Anker angezogen wurden, wenn sie dieselbe Oberfläche bei der nämlichen Entfernung boten. Diese Thatsache ist nach dem Gesetz des magnetischen Kreises zu betrachten. Die Pole sind flach. In einer gewissen Entfernung befindet sich ein runder Anker; es besteht ein gewisser Abstand von der polaren Oberfläche. Hat man in derselben Entfernung einen flachen Anker von gleicher Oberfläche und besteht mithin ungefähr dasselbe Zerstreuungsvermögen, so entsteht die Frage, weshalb in diesem Falle eine grössere Anziehung eintritt. Es ist klar, dass, wenn die Anker in dem gleichen Abstande sich befinden und denselben Raum für die Bewegung zulassen, bei dem runden Anker ein grösserer magnetischer Widerstand besteht, weil nur der nächste Theil der runden Oberfläche in der Entfernung wirkt und

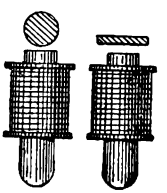


Fig. 83.

1) La Lumière Electrique, Bd. II.

Digitized by Google

der übrige Theil der unteren Fläche des Ankers entfernt liegt. Der Vortheil, der durch Ersetzung eines runden Ankers durch einen flachen Anker eintritt, besteht darin, dass der durch den Luftzwischenraum gebotene Widerstand vermindert wird. (Fig. 83.)

Polansätze an Hufeisenmagneten.

Eine andere Untersuchung von Du Moncel[1]) bezieht sich auf die Wirkung von polaren Ansätzen oder Schuhen — beweglichen Polstücken, — die auf dem hufeisenförmigen Elektromagnet angebracht werden. Der Kern dieses Magnetes bestand aus rundem Eisen von 4 *cm* Durchmesser, die parallelen Schenkel waren 10 *cm* lang und 6 *cm* von einander entfernt. Die Schuhe bestanden aus zwei flachen, an einem Ende ausgestanzten Eisenstücken, die über die Pole hinweggleiten und näher zusammen gebracht werden konnten. Die auf einen flachen Anker bei Luftzwischenräumen von 2 *mm* ausgeübte Anziehung wurde durch Gegengewicht gemessen. Erregte man diesen Elektromagnet mittels einer bestimmten Batterie, so war die Anziehung am grössten, wenn die Schuhe auf ungefähr 15 *mm*, oder ungefähr auf den vierten Theil des Abstandes der beiden Pole zusammengezogen worden waren. Die Ergebnisse waren:

Entfernung zwischen den Schuhen. Millimeter.	Anziehung in Grammen.
2	900
10	1012
15	1025
25	965
40	890
60	550

Mittels einer stärkeren Batterie zeigte der Magnet ohne Polschuhe eine Anziehung von 885 *g*, dagegen bei 15 *mm* von einander abstehenden Polschuhen 1195 *g*. Wenn nur ein Pol angewendet wurde, wurde die Anziehung, die ohne Schuh 88 *g* betrug, nach Hinzufügung eines Schuhes auf 39 *g* vermindert.

1) La Lumière Electrique, Bd. IV, S. 129.

Digitized by Google

Kapitel VI.

Regeln für die Wickelung der Kupferdrahtspulen.

Es soll nunmehr die Aufgabe über die Wickelung des Kupferdrahtes besprochen werden. Zunächst ist die Menge des erforderlichen Kupferdrahtes sowie die Drahtstärke zu bestimmen.

Der erste Theil der Aufgabe ist schon erledigt, denn wir kennen die Formel zur Berechnung der in einem gegebenen Fall erforderlichen Zahl erregender Ampère-Windungen. Es bleibt nur noch der Spulenraum und die Drahtmenge zu berechnen. Ein Strom von 10 Ampère, der einmal um das Eisen fliesst, ruft dieselbe Wirkung hervor, wie ein Strom von 1 Ampère Stärke, der zehnmal, oder wie ein Strom von nur einem Hundertstel Ampère Stärke, der tausendmal das Eisen umkreist. Die für Zwecke der Telegraphie benutzten Ströme sind von geringer Stärke, sie betragen in der Regel zwischen 0,005 und 0,020 Ampère. In solchen Fällen bedarf es nur dünnen Drahtes zur Wickelung, jedoch ist eine grosse Zahl Windungen nothwendig. Deshalb wird der Draht einen beträchtlichen Widerstand besitzen. Es ist dies kein Vortheil, bedingt aber nicht nothwendig einen grösseren Verlust an Energie, als wenn eine dickere Spule von weniger Umwindungen und bei einem entsprechend stärkeren Strom benutzt würde. Es enthalte eine Spule eine gewisse Zahl Drahtumwindungen, etwa 100, deren Querschnitt gross genug ist, um 1 Ampère Strom ohne Ueberhitzung auszuhalten. Die Wickelung bietet einen bestimmten Widerstand dar, sie wird einen bestimmten Betrag der Stromenergie verbrauchen und eine bestimmte magnetisirende Kraft besitzen. Die Spule werde mit anderer Wickelung versehen und zwar bestehe diese aus Draht, der nur den halben Durchmesser, wie der zuerst angewendete Draht besitzt. Dieser dünnere Draht besitzt ein Viertel des Querschnittes, die Spule demnach viermal soviel Windungen, (vorausgesetzt, dass das isolirende Material den gleichen Prozentsatz des nützlichen Raumes einnimmt). Die Stromstärke, die der Draht ertragen kann, wird ein Viertel der ersten Stromstärke

Digitized by Google

sein. Die Wickelung wird den sechzehnfachen Widerstand besitzen, weil der Draht viermal so lang wie der frühere Draht ist, und der Querschnitt ein Viertel beträgt. Der Verlust an Energie ist aber derselbe wie früher, weil er dem Widerstande und dem Quadrate der Stromstärke proportional ist; denn $16 \times \frac{1}{16} = 1$. In Folge dessen wird die Wärmewirkung die nämliche sein. Die magnetisirende Kraft wird auch die nämliche sein, denn die Stromstärke beträgt nur ein Viertel eines Ampère, der Strom durchfliesst aber 400 Windungen; die Ampère-Windungen betragen 100, ebensoviel als vorhin. Hinsichtlich des Verhaltens von Elektromagneten macht es also keinen Unterschied, ob sie mit dickem oder dünnem Draht bewickelt sind, vorausgesetzt, dass die Dicke des Drahtes dem Strome entspricht, den der Draht ertragen soll, d. h. dieselbe Anzahl Watt müssen in jedem Falle für die Erwärmung aufgewendet worden sein. Für einen Draht, der auf eine Spule von gegebenem Raum gewickelt worden ist, bleibt die magnetisirende Kraft für gleichen Wärmeverbrauch gleich. Der Wärmeverbrauch wächst jedoch in einem grösseren Verhältniss als die magnetisirende Kraft, wenn der Strom in einer gegebenen Wickelung stärker wird; denn die Wärme ist dem Quadrate der Stromstärke proportional, während die magnetisirende Kraft nur der Stromstärke proportional ist. In Wirklichkeit bestimmt demnach die erwärmende Wirkung die Drahtbewickelung. Wir müssen — unter der Voraussetzung, dass der Strom eine gewisse Stärke besitze — Raum genug zulassen, um die erforderliche Zahl von Ampère-Windungen ohne Ueberhitzung der Wickelung zu erhalten. Zur Berechnung einer Wickelung ist es zweckmässig, wenn man eine Stromstärke von ein Ampère annimmt. Derselbe Raum gilt für jede andere Drahtstärke, die einem beliebigen anderen Strome angepasst ist. Die Ausdrücke Magnet mit „langer „und „kurzer" Wickelung gelten für Elektromagnete, die viele Umwindungen aus dünnem Draht, oder eine geringe Zahl Umwindungen aus dickem Draht besitzen. Diese Ausdrücke sind den Ausdrücken „Wickelung von grossem oder geringem Widerstand", die oft zur Bezeichnung der zwei Klassen von Bewickelungen gebraucht werden, vorzuziehen, weil der Widerstand des Spulendrahtes an und für sich nichts mit der magnetisirenden Kraft zu thun hat. Ist der vom Kupfer auszufüllende Raum gegeben, so wird für irgend eine Stromdichte (z. B. für eine Stromdichte von 300 Ampère auf ein Quadratcentimeter Quer-

Digitized by Google

schnitt des Kupfers) die magnetisirende Kraft der Wickelungen für alle verschiedenen Drahtstärken die nämliche sein. Die specifische Leitungsfähigkeit des Kupfers ist von Wichtigkeit; denn je grösser die Leitungsfähigkeit, desto geringer ist der Wärmeverbrauch für das Cubikcentimeter Windung; sehr leitungsfähiges Kupfer ist deshalb in jedem Falle vorzuziehen.

Die Wärme, die auf diese Weise durch den elektrischen Strom erzeugt wird, erhöht die Temperatur der Wickelung (und des Kernes) und beginnt von der Mantelfläche auszustrahlen. Es mag als genügende Annäherung genommen werden, dass ein Quadratcentimeter Mantelfläche, die gegen die umgebende Luft eine um 1° Celsius höhere Temperatnr besitzt, gleichförmig Wärme im Betrage von etwa 1/800 Watt aussendet. Würde die Mantelfläche der Wickelung ausreichen, um eine gleichförmige Wärmeabgabe im Betrage von 1 Watt[1]) auf 1 Quadratdecimeter Oberfläche zu ermöglichen, so würde die Temperatur jener Oberfläche um etwa 8° C. über die Temperatur der umgebenden Luft steigen. Diese Zahl wird durch das mittlere Wärmeausstrahlungsvermögen von Substanzen wie Baumwolle, Seide, Firniss und anderen Materialien, aus denen die Oberfläche der Wickelungen in der Regel hergestellt ist, bestimmt.

Für Dynamomaschinen wird gewöhnlich gefordert, dass die Drahtumwindungen sich nur um eine bestimmte Anzahl Grade über die Temperatur der Luft erwärmen sollen. Die Wickelung eines Elektromagnetes sollte sich nicht höher als bis 55° Celsius über die Temperatur der umgebenden Luft erwärmen. In manchen Fällen hat es kein Bedenken, diese Grenze zu überschreiten.

Der Widerstand des isolirten Kupferdrahtes einer Spule kann mit Hülfe der folgenden Formel annähernd berechnet werden: Wenn d der Durchmesser des Drahtes in Millimeter und D der Durchmesser des Drahtes einschl. der Isolirhülle ist, so wird der Widerstand für das Kubikcentimeter der Spule betragen:

---

1) Das Watt ist die Einheit des Betrages an Energieverbrauch und ist gleich zehn Millionen Ergs in der Secunde oder $\frac{1}{736}$ Pferdekraft. Ein Strom von ein Ampère, der durch einen Widerstand von ein Ohm fliesst, verausgabt Energie durch die Erwärmung zu dem Betrage von einem Watt. Ein Watt ist gleich 0,24 Wärme Calorien in der Sekunde. Die durch den Energieaufwand von 1 Watt in 1 Secunde entwickelte Wärme würde genügen, um 1 Gramm Wasser um 0,24° Celsius zu erwärmen.

Digitized by Google

$$\text{Ohm auf 1 Cubikcentimeter} = \frac{1}{41\ D^2 \times d^2}$$

Wir können mithin eine Tafel über Drahtstärken und Stromstärken aufstellen, die uns in den Stand setzt, den Grad der Erwärmung einer Spule auszurechnen, wenn letztere von einem gegebenen Strom durchflossen wird, oder, umgekehrt, zu berechnen, welcher Raum für die Umwindungen erforderlich ist, ohne dass der Strom sie über das vorgeschriebene Höchstmass erwärmt.

Diese am Schluss des Buches befindliche Tafel wird im Technical College zu Finsbury benutzt. Sie ist nach meiner Anleitung von dem Assistenten des Collegs, Herrn Eustace Thomas, berechnet worden. Für manche Zwecke, wie z. B. für Telegraphenapparate, Wecker werden dünnere Drähte als die in der Tafel erwähnten verlangt. Die Tafel soll wesentlich für Berechnung von Magneten in grösseren maschinellen Anlagen dienen.

Nach einer annäherenden, bequemen Regel rechnet man etwa für 0,6 Quadratmillimeter Querschnitt 1 Ampère Stromstärke. Dies ist, wie die Angaben der Tafel zeigen, eine falsche Regel. Unter der Kopfüberschrift 1000 Ampère auf 6,45 *qcm* (1 engl, Quadratzoll) oder von 1,55 Ampère auf 1 *qmm* findet man, dass der Drath No. 18 von der *S. W. G.* Drahtlehre bei der gedachten Stromdichte 1,81 Ampère Strom führt, dass, wenn nur eine Drahtlage vorhanden ist, sie nur um 2,58° Celsius erwärmt wird, und dass man demnach Lage auf Lage wickeln kann bis zu einer Dicke von 8,4 *cm*, ohne dass man zur Grenze hinaufkommt, die 1 Watt auf 1 englischen Quadratzoll (= 6,45 *qcm*) für die Wärmeausstrahlung gestattet. In sehr wenigen Fällen ist man gezwungen, die Spule bis auf 8,4 *cm* Dicke zu wickeln. Nur bei wenigen Elektromagneten wird es erforderlich, dass die Spule über $1^1/_4$ *cm* Dicke erhält. Wenn aber die Windungsschicht nur $1^1/_4$ *cm* dick oder nur ungefähr ein siebentel von 8,4 *cm* beträgt, so kann man eine Stromdichte anwenden, die $\sqrt{7}$ mal so gross ist als sich nach 1000 Ampère auf den englischen Quadratzoll (d. i. auf 6,45 *qcm*) berechnet, ohne die Grenze der Betriebssicherheit zu überschreiten. Bei Spulen von $1^1/_4$ *cm* Wickelungsdicke kann man ohne jede Gefahr eine Stromdichte von 3000 Ampère auf den englischen Quadratzoll (6,45 *qcm*) oder von 4,65 Ampère auf das *qmm* mit Rücksicht darauf anwenden, dass der Kern bei der Vertheilung und Abgabe der Wärme mitwirkt.

Digitized by Google

Nehmen wir einen Hufeisenmagnet mit einem Kern von 2,54 *cm* Durchmesser, für den eine magnetisirende Kraft von 2400 Ampèrewindungen erforderlich ist. Die Spule soll sich nicht über 28° Celsius über die Temperatur der umgebenden Luft erwärmen. Welcher Wickelungsraum muss hiernach verlangt werden? Nehmen wir zunächst an, der Strom besitze 1 Ampère Stärke. Dann müssen auf den Kern 2400 Windungen eines Drahtes gebracht werden, der 1 Ampère Strom erträgt. Wenn wir den Draht No. 20 der *S. W. G.* Lehre nehmen und ihn bis zu einer Dicke von $1^1/_4$ *cm* aufwickeln, so würde dieses 85 Umwindungen auf ein Centimeter Spulenlänge ergeben, so dass eine Spule von 28 *cm* Länge und mit einer Umwickelung, die etwas dicker als $1^1/_4$ *cm* (oder 11 Lagen) wäre, 2400 Umwindungen enthalten würde. Die Tafel im Anhang zeigt, dass, wenn dieser Draht einen Strom von 1,018 Ampère leiten soll und bis zu einer Dicke von 9,9 *cm* gewickelt wäre, er sich um 125° Cels. (225° Fahrenheit) erwärmen würde. Ist er aber nur bis zu $1^1/_4$ *cm* dick gewickelt, so würde er sich daher nur um ungefähr 19° Cels. erwärmen. Dieser Draht würde zu gut sein; versuchen wir es mit dem nächst dünneren Drahte. Der Draht No. 22 der *S. W. G.* Lehre wird bei 2000 Ampère auf den englischen Quadratzoll (oder von 3,1 Ampère auf das Quadratmillimeter) einen Strom von 1,23 Ampère leiten und sich um 125° Celsius erwärmen, wenn er bis zu einer Dicke von 2,87 *cm* gewickelt ist. Wenn er nur bis um 28° Celsius sich erwärmen soll, so darf er nicht viel dicker als 0,64 *cm* gewickelt werden. Da er aber nur einen Strom von 1 Ampère leiten soll, so darf er immerhin ein wenig dicker — etwa 14 Lagen dick — gewickelt werden. Es ist dann eine Umwickelung von ungefähr 18,3 *cm* Länge erforderlich, um die 2400 Umwindungen zu erhalten. Der Draht wird ungefähr 24,8 *qcm* des gesammten Querschnittes einnehmen, und der Inhalt des von der Umwickelung eingenommenen Raumes wird 305 Cubikcentimeter betragen. Zwei Spulen von je 9,2 *cm* Länge und 1,6 *cm* Tiefe für die 14 Lagen werden für die Aufnahme der Drahtumwickelung geeignet sein.

Wenn man klar den Sachverhalt übersieht und die Beziehung zwischen der Wärmeausgabefähigkeit der Oberfläche, dem Betrage der Erwärmung durch den Strom und der Temperaturgrenze kennt, so ersieht man, wie wenig Berechtigung für Erfahrungsregeln, wie die häufig angegebene, vorliegt, dass nämlich die

Digitized by Google

Wickelung der Spule so dick wie der Durchmesser des Eisenkernes herzustellen sei. Betrachten wir dieses in Beziehung auf die Thatsache, dass in allen Fällen, in denen die Zerstreuung vernachlässigt werden kann, die Zahl der Ampère-Windungen, die einen dünnen Eisenkern zu einem vorgeschriebenen Grad der Magnetisirung anregen, einen Kern von beliebigem Querschnitt und von derselben Länge zu dem gleichen Grade magnetisiren. Eine Regel, wonach die Tiefe der Kupferwickelung proportional dem Durchmesser des Eisenkernes wachsen soll, ist unrichtig.

Wenn weniger genaue Näherungswerthe verlangt werden, kann man nach einfachern Regeln verfahren.

Es mögen zwei Fälle betrachtet werden.

1. Fall. Die Zerstreuung ist zu vernachlässigen. B sei = 16000 so dass $H = 50$. Daher wird die Zahl der Ampère-Windungen auf das Centimeter Eisenlänge 40 betragen müssen; denn H ist gleich 1,2566 mal der Zahl Ampère-Windungen auf das Centimeter. Wenn nun die Bewickelung in der Dicke nicht über $1^1/_4$ Centimeter hinausgeht, so können wir 4000 Ampère auf den engl. Qnadratzoll oder 6,2 Ampère auf das Quadratmillimeter gestatten, ohne dass eine ernstliche Überhitzung eintritt. Demnach wird jedes Centimeter der $1^1/_4$ Centimeter dicken Windung genügen, um 20 Centimeter Länge des Eisens bis zum vorgeschriebenen Grade zu magnetisiren.

2. Fall. Die Zerstreuung betrage 50 Prozent. B sei im Luftzwischenraum $= H = 8000$, so müssen, um diese Kraftlinien hindurch zu treiben, 6400 Ampère-Windungen auf das Centimeter Luft verlangt werden. Wenn nun die Bewickelung $1^1/_4$ *cm* in der Dicke nicht übersteigt, so wird jedes Centimeter Länge der Spule 800 Ampère-Windungen besitzen. Es werden demnach 8 Centimeter Länge von $1^1/_4$ *cm* dicker Wickelung für 1 *cm* Länge des Luftzwischenraumes erforderlich sein, damit bis zum vorgeschriebenen Grad magnetisirt werde.

Wickelungen für gleichbleibende Spannung und gleichbleibende Stromstärke.

Wenn es sich um Drahtspulen für Magnete handelt, die in einem elektrischen Beleuchtungssystem anzuwenden sind, so ist sorgfältig darauf Bedacht zu nehmen, dass die den Verhältnissen der Anlage entsprechenden Regeln befolgt werden. Wenn die

Digitized by Google

Anlage für gleichbleibende Spannung eingerichtet ist, so erfolgt die Bewickelung der Elektromagnetspulen nach der nämlichen Regel wie die Bewickelung der Spulen des Spannungsmessers. Ist dagegen die Anlage für gleichbleibende Stromstärke eingerichtet, wie dieses bei Bogenlampen in Reihenschaltung zutrifft, so müssen die Spulen mit Rücksicht auf den Strom bewickelt werden, den der Draht ertragen soll, wenn er in Lagen von passender Dicke angewendet wird. Dabei ist die Zahl der Umwindungen bei Benutzung dünneren oder dickeren Drahtes die gleiche.

Wenn die durch die Sicherheit gebotene Grenze der Temperatur 50° Celsius höher als die der umgebenden Luft angenommen wird, so wird die grösste Stromstärke, die für einen gegebenen Elektromagnet angewendet werden kann, ausgedrückt durch die Formel:

Höchst zulässige Zahl der Ampère $= 0{,}25\ \sqrt{\frac{s}{r}}$, wenn s die Zahl Quadratcentimeter Oberfläche der Wickelung und r der Widerstand in Ohm ist.

In ähnlicher Weise gilt für die als Nebenschluss benutzten Spulen:

Höchst zulässige Zahl der Ampère $= 0{,}25\ \sqrt{s.r}$.

Die magnetisirende Kraft einer Spule, die mit einer gegebenen Anzahl Volt Spannung erzielt wird, ist unabhängig von der Länge des Spulendrahtes, und hängt nur von der Drahtstärke ab; je länger der Draht, desto geringer ist der Verlust durch Wärmebildung. Dagegen ist die magnetisirende Kraft einer Spule, wenn mit gleichbleibender Stromstärke gearbeitet wird, unabhängig von der Stärke des Drahtes, und hängt lediglich von der Länge des Drahtes ab; aber je stärker der Draht ist, desto geringer ist der Verlust durch Wärmebildung.

Verschiedene Regeln über die Wickelung.

Will man dieselbe Temperaturgrenze bei Spulen gleicher Abmessungen, die mit Draht verschiedener Stärke bewickelt sind, erreichen, so muss der Querschnitt des Drahtes mit der Stromstärke sich ändern, oder mit anderen Worten, die Stromdichte (Ampère auf das Quadratcentimeter) muss für jede Wickelung die nämliche sein. Die Tafel im Anhang zeigt die Stromstärken für verschiedene starke Drähte bei vier verschiedenen Werthen der Stromdichte.

Digitized by Google

Um zwei ähnlich gestaltete Spulen, die nur in den Abmessungen verschieden sind und deren Drahtstärken in dem gleichen Verhältniss stehen, so dass sich die gleiche Anzahl Umwindungen auf der grossen und kleinen Spule befindet, auf die nämliche Temperatur zu erwärmen, müssen die Stromstärken proportional den Quadratwurzeln aus den Kuben der linearen Abmessungen sein.

Sir William Thompson hat eine nützliche Regel für die Berechnung der Bewickelung von Elektromagneten derselben Form, aber verschiedener Abmessung gegeben.

Ähnliche Eisenkerne, bei denen die Länge des Wickelungsdrahtes proportional den Quadraten ihrer linearen Abmessungen sind, werden, wenn sie ähnlich bewickelt und mit gleichen Stromstärken erregt werden, gleich starke magnetische Felder an gleichartig gelegenen Stellen hervorrufen.

Ähnliche Elektromagnete verschiedener Abmessung erfordern eine Anzahl Ampère-Windungen, die ihren linearen Abmessungen proportional sind, falls sie bis zu einem gleichen Grad der Sättigung magnetisirt werden sollen.

Verschiedene Arten der Wickelungen.

Es ist in Vorschlag gebracht worden, in Wickelungen Draht von abgestufter Stärke anzuwenden. Sir William Thomson hat gezeigt, dass es für die Herstellung der Umwindungen von Galvanometern vortheilhaft sei, für die inneren Windungen von geringerem Durchmesser dünnen Draht zu benutzen und bei wachsendem Durchmesser der Umwindungen, einen dickeren Draht zu verwenden; der dickste Draht bildet die äusserste Schicht. Die Stärke des Drahtes ist demnach proportional dem Durchmesser der Wickelung. Es folgt aber hieraus nicht, dass der Vorschlag zur Benutzung von Draht von abgestufter Stärke, der für Galvanometer zweckmässig ist, auch für Elektromagnete zweckentsprechend sein müsse. Bei der Herstellung von Elektromagneten wird es nothwendig, auf Beseitigung der Wärme hinzuwirken; es ist einleuchtend, dass die äussersten Schichten am günstigsten zur Erreichung dieses Zweckes liegen. Die Erfahrung zeigt, dass die unteren Lagen der Elektromagnetwickelungen stets eine höhere Temperatur erreichen, als die an der Oberfläche liegende Schicht. Werden die inneren Lagen mit einem dünneren, mehr Wider-

Digitized by Google

stand bietenden und mehr Wärme erzeugenden Draht bewickelt, als die äusseren Schichten, so muss das Bestreben der Überhitzung begünstigt werden. Die Elektromagnete müssten demnach mit Drähten bewickelt werden, die in den inneren Lagen stärker, und in den äusseren Schichten dünner sind.

Eine andere Art der Bewickelung besteht darin, dass mehrere Drähte nebeneinander geschaltet werden. Man benutzt dann für jede andere Schicht einen besonderen Draht. Alle vorderen Enden und ebenso auch alle hinteren Enden der Drähte werden an je einem Spulenende zusammengelöthet. In magnetischer Hinsicht bietet diese Art der Wickelung nicht den geringsten Vortheil gegenüber der Wickelung mit einfachem starkem Drahte von gleichwerthigem Querschnitt. Aber man fand neuerdings, dass die Wickelung mit vielfachem Drahte einen Vorzug besitzt, dass nämlich ihre Anwendung das Bestreben der Funkenbildung, die bei Unterbrechung des Stromkreises eintritt, vermindert.

Eine weitere von Victor Serrin im Jahre 1876 vorgeschlagene Wickelungsart besteht darin, einen mit Schmelz isolirten Eisenkern mit flachen Spiralen aus Kupferblech, das ebenfalls mit Schmelzüberzug versehen ist, zu bewickeln.

Wickelung in Abtheilungen.

In einem besonderen Fall ist es vortheilhaft, eine Spule in Abtheilungen zu wickeln, das heisst entlang der Spule in Abständen Scheidewände zu bilden und den Draht so zu wickeln, dass nacheinander jeder der Zwischenräume zwischen den Scheidewänden ausgefüllt wird. Diese Herstellung bietet einen Vortheil, wenn die Spule mit Strömen von hoher Spannung betrieben werden soll. Denn in diesem Falle wird auf das Isolirmaterial eine Spannung[1]) ausgeübt, die eine Durchschlagung des Materials befürchten lässt. Bei der Wickelung in Abtheilungen, wie sie zuerst von Ritchie vorgeschlagen wurde, besteht nie ein so

1) Die auf Durchbrechung des Isolirmaterials hinwirkende Spannung ist proportional dem Quadrate der Potentialdifferenz (auf die Einheit der Stärke), der das isolrende Material unterliegt. Es ist unrichtig, wenn man von der Spannung des Leiters oder von der Spannung des Stromes spricht, denn die Spannung oder elektrische Kraft ist immer ein Zustand, der auf das Dielektrikum oder das isolirende Material wirkt.

Digitized by Google

grosser Potentialunterschied zwischen den Windungen zweier benachbarten Schichten, wie es der Fall ist, wenn die Schichten von einem Ende zum andern Ende der Spule reichen. Infolgedessen herrscht keine so grosse Spannung am Isolirmaterial zwischen den Schichten, und wenig Wahrscheinlichkeit, dass das Isolirmaterial durch einen durchschlagenden Funken beschädigt wird.

Trugschlüsse hinsichtlich der Wickelung.

Von Zeit zu Zeit tauchen irrige Angaben über die Wickelung von Elektromagneten auf. Im Jahre 1869 nahm ein gewisser Lyttle ein Patent auf folgende Art der Bewickelung. Man wickele die erste Lage wie gewöhnlich, biege dann den Draht zurück zum Anfang der Wickelung, wickele die zweite Lage und so weiter. Auf die Weise werden alle Windungen rechtsgängig oder alle linksgängig sein, nicht abwechselnd rechts- oder linksgängig wie bei der gewöhnlichen Wickelung. Lyttle erklärte, dass diese Art der Wickelung eine stärkere Wirkung erziele. Ebenso verfuhr M. Brisson, der die nämliche Art der Wickelung im Jahre 1873 noch einmal erfand und genau beschrieb. Ihre angebliche Ueberlegenheit wurde von Preece widerlegt, der als einzigen Unterschied hervorhob, dass die Ausführung der Bewickelung schwieriger sei als die der gewöhnlichen Wickelung.

Nach einem anderen verbreiteten Irrthum sollen Elektromagnete, in denen die Drähte schlecht isolirt sind, kräftiger sein als solche, in denen die Drähte gut isolirt sind. Dieser Irrthum kann durch den unrichtigen Betrieb von Elektromagneten mit langer, dünner Umwindungsspirale (von hohem Widerstande) mittels einer aus wenigen Zellen bestehenden (geringe elektromotorische Kraft besitzenden) Batterie entstanden sein. In solchen Fällen fliesst, falls einige Windungen kurz geschlossen sind, mehr Strom durch die Wickelung, und die magnetisirende Kraft kann grösser werden. Die sachgemässe Abhülfe besteht darin, dass man entweder den Magnet mit Windungen von dickerem Drahte neu bewickelt, oder eine andere Batterie mit grösserer elektromotorischer Kraft anwendet.

Isolation des Drahtes.

Anweisungen, über die geeignete Isolation der Drähte, sowie über die Isolirung benachbarter Lagen, sind bei der Aufführung der Materialien auf den Seiten 54 bis 59 gegeben worden.

Digitized by Google

Besondere Angaben.

Man trifft zuweilen auf Angaben für die Bauart, nach denen die Spulen einen gewissen Widerstand besitzen sollen. Dies ist unrichtig. Widerstand trägt nicht zur Magnetisirung des Kernes bei. Eine bessere Vorschrift für die Wickelung besteht in Angabe der Ampère-Windungen und der Temperaturgrenze für die Erwärmung. Man kann auch die Anzahl Watt vorschreiben, die der Magnet beansprucht. Zweckmässig wäre es, wenn man in Betreff einer Grösse Einigung erzielen könnte, mittels deren Elektromagnete verglichen werden. Dabei wäre zu berücksichtigen: die magnetische Leistung — d. i. das Product aus der magnetischen Strömung mit der magnetomotorischen Kraft — ferner der Aufwand an Energie in Watt, die Temperaturerhöhung und Ähnliches.

Über den Widerstand des Elektromagnetes und der Batterie.

Bei der Behandlung der Frage über die Bewickelung eines Magnetkernes möchte ich eine Regel erwähnen, die oft angeführt wird, die aber besser aus unseren Lehrbüchern verschwände, und die eigentlich besagt, dass wir 50 Prozent der aufzuwendenden Energie verschwenden müssen. Ich meine die Regel, nach der man die grösste Wirkung von einem Elektromagnet erhält, wenn der Widerstand der Wickelung gleich dem Widerstand der Batterie ist, oder die Annahme, dass für einen Magnet von gegebenem Widerstand eine Batterie von dem nämlichen Widerstand anzuwenden ist. Was bedeutet diese Regel? Sie ist durchaus sinnlos, abgesehen von dem ersten Fall, wenn in diesem der Raum der Spule ein für allemal vorgeschrieben und eine Änderung nicht möglich ist, oder wenn die Zahl der benutzbaren Batterieelemente ein für allemal gegeben ist. Ist eine bestimmte Zahl von Elementen gegeben, und soll damit die grösste Wirkung in einem äusseren Stromkreise erzielt werden, lassen sich mehr Zellen nicht beschaffen, so muss man die Elemente so schalten, dass der innere Widerstand gleich dem äusseren Widerstand, in dem sie wirken sollen, ist. Dann geht aber die halbe Energie der Batterie verloren, während die Leistung ein Maximum wird. Die Anordnung, wodurch der Widerstand der Batterie gleich dem Widerstand des Aussenkreises gemacht wird, passt nicht für Betriebszwecke; die Regel ist nicht

Digitized by Google

allein irrig, sondern auch ganz unrichtig, wenn es sich um Ströme handelt, die plötzlich verschwinden oder entstehen. Für manche Apparate, wie z. B. für einen Wecker, oder für einen rasch arbeitenden Telegraphen, für eine Inductionsspule oder für irgend einen Zweck, der das rasche Ansteigen oder Abfallen des Stromes bedingt, stimmt die Regel nicht. In jedem Falle ist die Leitung zu berücksichtigen. Zur Correspondenz in einer Leitung bedarf es einer Batterie und eines Elektromagnetes. Ist die Leitung kurz und von starkem Durchmesser, (einige wenige Meter guten Kupferdrahtes), so sind wenige grosse Zellen, oder eine grosse Zelle und ein kurzer starker Spulendraht auf dem Elektromagnet erforderlich. Handelt es sich um eine lange dünne Leitung, so braucht man eine Reihe kleiner Zellen und einen langen dünnen Spulendraht.

Die vorstehend gegebene Regel erledigt nicht die ganze Aufgabe, weil noch etwas mehr als der gesammte Widerstand des Stromkreises in Rechnung zu ziehen ist. Bei schnell arbeitenden Apparaten haben wir mit der Thatsache zu rechnen, dass der Strom während des veränderlichen Zustandes nicht sowohl durch den Widerstand, als durch das Beharrungsvermögen des Stromkreises — durch sein elektromagnetisches Beharrungsvermögen — bestimmt wird. Dieser Gegenstand wird später besondere Aufmerksamkeit in Anspruch nehmen.

Wirkung der Ausdehnung einer Wickelung.

Da die magnetisirende Kraft einer Wickelung auf einen magnetischen Kreis den Ampère-Windungen einfach proportional ist, folgt, dass die Umwindungen, die in den aussenliegenden Schichten liegen, obwohl sie weiter vom Eisenkern entfernt sind, die gleiche magnetisirende Kraft besitzen. Dies trifft für alle geschlossenen magnetischen Kreise zu; bei offenen magnetischen Kreisen, in denen Zerstreuung stattfindet, trifft es nur für jene Umwindungsdrähte zu, von denen die Zerstreuungslinien umfasst werden. Von den weiten Umwindungen der äusseren Wickelung eines stabförmigen Elektromagnetes schliessen z. B. die den mittleren Theil des Stabes umgebenden Windungen alle magnetischen Kraftlinien in sich. Sie sind also ebenso wirksam als die engeren Windungen, die unter ihnen liegen, während die weiten Umwindungen, von denen die Endtheile des Stabes umgeben sind,

Digitized by Google

nicht so wirksam sein können, weil manche Kraftlinien ausserhalb dieser Umwindungen verlaufen.

Wirkung der Lage einer Wickelung.

Unter den von Du Moncel angestellten Versuchen befand sich einer über die beste Stelle für die Anbringung der Wickelung auf dem Eisenkern. Diese Frage ist auch von Andern behandelt worden. In dem Werke von Dub „Elektromagnetismus", finden sich einige Versuche über die beste Lage einer Wickelung. Du Moncel verwendete vier Paar Spulen von gleicher Drahtlänge; jede war aus 50 *m* Draht hergestellt; ein Paar war 16 *cm* lang, ein anderes 8 *cm* oder halb so lang, aber nicht von gleicher Windungszahl, weil der Durchmesser der äusseren Windungen grösser war. Ein drittes Paar besass 4 *cm*, das vierte Paar 2 *cm* Länge. Sowohl unter Verwendung von Stabmagneten als auch von hufeisenförmigen Magneten wurden mit diesen Wickelungen Versuche angestellt. Es genügt, das Ergebniss der Versuche mit dem Hufeisenmagnet anzuführen. Der Hufeisenmagnet war lang genug — 16 *cm* — um die längste Spule zu tragen. Wenn nun die kurzen Spulen von 2 *cm* Länge benutzt wurden, so war die Anziehung auf den 2 *mm* von den Polen entfernten Anker (es war im Laufe der Versuche immer derselbe) 40 *g*. Benutzte er dasselbe Gewicht Draht, vertheilte letzteren aber in der doppelten Ausdehnung über die Spule, so betrug die Anziehung 55 *g*. Bei Verwendung der Spulen von 8 *cm* Länge betrug die Anziehung 75 *g* und beim Gebrauch der Spulen von 16 *cm* Länge, die jeden Schenkel in ganzer Länge bedeckten, 85 *g*. Dies zeigt, dass bei gegebener Eisenlänge die beste Bewickelung für einen mit möglichst grosser Anziehungskraft auszustattenden Magnet nicht in der Anhäufung der Umwindungen an den Polen besteht, sondern durch gleichförmige Bewickelung erzielt wird, denn diese Art de Wickelung liefert die meisten Umwindungen, folglich mehr Ampère-Windungen und deshalb stärkere Magnetisirung. In einigen Fällen kann jedoch eine Abweichung eintreten, wenn nämlich ein grösserer Prozentsatz Zerstreuung besteht. Mit Hufeisenmagneten, deren Wickelung auf einem Schenkel liegt, sind Ergebnisse derselben Art erzielt worden. In jedem Falle fand man, dass die Windungen am besten so viel als möglich über die Länge des Schenkels zu vertheilen waren. Alle Versuche wurden mit stetigem Strom angestellt. Wenn die Wickelung des Drahtes über die

Digitized by Google

ganze Kernlänge bei Anwendung stetiger Ströme die beste ist, so folgt aber daraus nicht, dass auch diese Wickelung für rasch veränderliche Ströme zweckmässig ist. Es soll gezeigt werden, dass diese Folgerung nicht zutrifft.

Missgriffe bei der Bauart.

Zuweilen ist es vortheilhaft, Fehler oder Missgriffe in der Bauart zu betrachten und die Gründe der Fehlerhaftigkeit zu erforschen. Die Figur 84 liefert dazu ein Beispiel. Sie stellt eine der vielen von Roloff erfundenen Formen dar und zeigt drei gleiche cylindrische Kerne, deren Enden die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden; der Anker ist eine gleichseitige dreieckige Eisenplatte mit abgerundeten Ecken. Es würde sicher ungewöhnlich sein, wenn man die Spulen so wickelt, dass alle drei Polenden zu Nordpolen werden. Wenn das eine Ende ein Nordpol wird, so müssen die zwei anderen Südpole bilden.

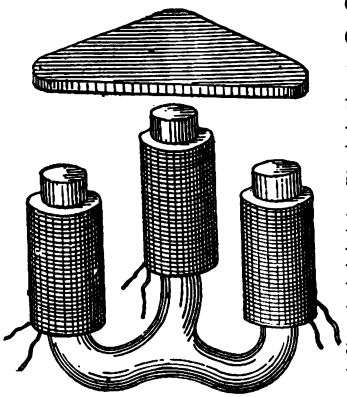


Fig. 84.

Gegen eine solche Bauart — einen dreipoligen Magnet — ist an sich kein Einwand zu erheben. Ein guter dreipoliger Magnet ist am Schluss des Kap. IX dargestellt. Um aber den Gedanken passend auszuführen, müsste einer der Kerne den doppelten Querschnitt jedes der beiden anderen Kerne besitzen, so dass die magnetischen Kraftlinien, die von zwei Kernen ausgehen, und zum anderen zurückkehren, einen gleichwerthigen Eisenquerschnitt finden.

Ein anderer Missgriff in der Bauart, der sowohl bei den Feldmagneten der Edison'schen Dynamomaschinen als auch bei einigen von Gramme's frühesten Mustern gemacht worden ist, besteht darin, dass verschiedene parallele Kerne benutzt wurden, von denen jeder eine besondere Wickelung trug. Die Kerne waren zu einem gemeinschaftlichen Polstück am einen Ende und zu einem gemeinschaftlichen Joch am anderen Ende wie die Figur 85 zeigt, vereinigt. Den Eisenschenkel in dieser Weise zu theilen, ist sehr unvortheilhaft. Wenn die Spulen so gewickelt werden, das sie gleiche Polarität in den parallelen Kernen hervorrufen, wird

Digitized by Google

viel Draht nutzlos verbraucht, weil in den Zwischenräumen zwischen zwei solchen Kernen Ströme wirken, die in entgegengesetzten Richtungen fliessen und sich gegenseitig in der magnetisirenden Wirkung schädigen. Es würde besser sein, den Draht um die Aussenseite aller Kerne zu wickeln und die Zwischenräume mit Eisen auszufüllen oder einen massiven Kern zu benutzen. Die Figur 86 zeigt drei Arten der Wickelung; die Figur *a* entspricht dem in Figur 85 dargestellten Magnet. Wenn jeder der drei Eisenkerne 3 *cm* Durchmesser besitzt und die Umwindungsschicht 0,5 *cm* dick ist, so wird die (mittlere) Länge des zu einer Umwindung erforderlichen Drahtes fast genau 11 *cm* betragen; sodass zu einer Umwindung für den gesammten Eisenquerschnitt eine Länge von 33 *cm* erforderlich ist. Wenn indessen der Draht zugleich um alle drei Kerne, wie in Figur 86b, herumgeführt wird, braucht man nur eine Länge von 27 *cm*. Wenn endlich dieselbe Menge Eisen in einen Cylinder von dem nämlichen Querschnitt zusammengeschmolzen würde, so stellt sich die mittlere Länge Draht, die zu einer Umwindung erforderlich ist, auf nur 19,5 *cm*

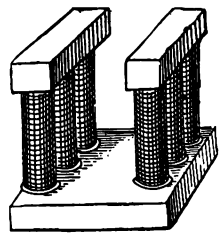


Fig. 85.

Zur Sicherung des wirthschaftlichen Verbrauches an Kupfer ist also die Frage zu lösen, welche die beste Form des Querschnittes für die Kerne sein wird. Durch geometrische Betrachtung ergibt sich, dass von allen möglichen Formen, die gleiche Flächen einschliessen, der Kreis den kleinsten Umfang besitzt. Zur Erleichterung des Vergleiches sind in der folgenden Tafel die Drahtlängen berechnet, die verschiedene Querschnitts-Formen von gleicher Fläche umschliessen. Die Fläche des einfachen Kreises ist dabei als Einheit angenommen worden.

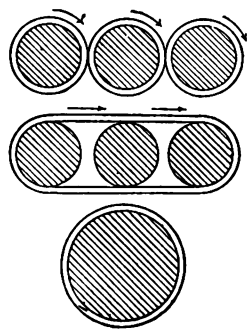


Fig. 86.

Kreis	3,54
Quadrat	4,00
Rechteck 2 : 1	4,24
Rechteck 3 : 1	4,62
Rechteck 10 : 1	6,91

Digitized by Google

Längliches Viereck, von einem Quadrate zwischen zwei Halbkreisen gebildet .	3,76
Längliches Viereck, von zwei Quadraten zwischen zwei Halbkreisen gebildet .	4,28
Zwei aneinanderstossende Kreise . .	4,997
Zwei Kreise, aber Draht um beide zugleich gewickelt	4,10
Drei Kreise, Draht um alle zusammen gewickelt	6,13
Vier Kreise, Draht um alle zusammen gewickelt	7,09

Beziehung des Widerstandes zur Masse der Wickelung und zur Stärke des Drahtes.

Setzt man voraus, dass die Dicke der Isolation proportional der Dicke des nackten Drahtes ist, so folgt, dass das Gewicht des Kupfers der Wickelung, die eine Spule von gegebenen Abmessungen ausfüllt, bei Anwendung dickeren oder dünneren Drahtes gleich bleibt. Für einen gegebenen Raum, der mit Windungen gefüllt werden soll, wird der Widerstand in Ohm wie das Quadrat der Windungszahl sich ändern. Denn wenn man eine Spule von 100 Umwindungen einer bestimmten Drahtstärke mit 200 Umwindungen eines Drahtes, der die halbe Querschnittsfläche des ersten Drahtes besitzt, neu bewickelt, so wird der Widerstand der neuen Wickelung viermal so gross als der Widerstand der ursprünglichen Wickelung. Ebenso folgt durch eine ähnliche Betrachtung, dass der Widerstand einer Wickelung von gegebenem Rauminhalt sich umgekehrt wie das Quadrat der Querschnittsfläche des benutzten Drahtes ändert. Da nun diese Fläche proportional dem Quadrate des Drahtdurchmessers ist, so folgt auch, dass der Widerstand sich umgekehrt wie die vierte Potenz des Drahtdurchmessers ändern muss. Diese Regeln bilden nur Näherungen, weil bei Anwendung dünnerer Drähte die Isolationsschicht verhältnissmässig dicker ist, als bei Verwendung dickerer Drähte. Die auf Seite 170 gegebene Formel ist von Nutzen.

Formel von Brough.

Eine bessere Regel ist von Brough[1]) gegeben worden. Es wird nur die Voraussetzung gemacht, dass die Umwindungen

1) Journal Society Telegraph Engineers, vol. V. S. 256.

Digitized by Google

genau übereinander aufgebracht sind, anstatt dass sie in der rinnenartigen Vertiefung der etwa darunter liegenden Drähte liegen.

Es soll der Durchmesser d eines Drahtes, der eine Spule von gegebenen Abmessungen (äusserem Durchmesser A, innerem Durchmesser a, Länge b) ausfüllt und einen gegebenen Widerstand von R Ohm besitzt, ermittelt werden. Die radiale Tiefe der Isolationsschicht sei u, der Widerstand eines Drahtes für die Längeneinheit und die Einheit des Durchmessers sei $= c$ (in Ohm), so ist;

$$d = \sqrt{u^2 + \sqrt{\frac{\pi\, b\, c\, (A^2 - a^2)}{4\, R}}} - u$$

und die gesammte Länge des Drahtes

$$l = \frac{\pi\, b\, (A^2 - a^2)}{4\, (2u + d)^2}$$

Beim Gebrauch der Formeln sind alle Längen in der nämlichen Masseinheit auszudrücken.

Digitized by Google

Kapitel VII.

Einzelheiten der Bauart. Schnell arbeitende Elektromagnete, Relais und Chronographen.

Es sollen nunmehr verschiedene Einzelheiten, die von Wichtigkeit bei Herstellung von Elektromagneten für besondere Zwecke sind, betrachtet werden.

Gegensatz zwischen Elektromagneten und Dauermagneten.

Es darf hier der Hinweis nicht unterlassen werden, dass sämmtliche Ergebnisse in den beiden vorhergehenden Kapiteln nicht gleicherweise für stählerne Dauermagnete anwendbar sind und zwar nicht aus dem folgenden Grunde. Bringt man einen Elektromagnet dem Anker nahe und verbessert so den magnetischen Kreis, so erhält man nicht nur mehr magnetische Kraftlinien, die durch den Anker gehen, sondern auch mehr magnetische Kraftlinien, die durch das ganze Eisen treten. Wir bekommen mehr magnetische Kraftlinien in der Biegung, wenn ein Anker an die Pole gelegt wird, weil dann ein magnetischer Kreis von geringerem Widerstande mit der nämlichen äusseren magnetisirenden Kraft in der umgebenden Umwickelung besteht. In diesem Falle erhält man einen stärkeren magnetischen Strom im gesammten Stromwege. Die mit dem Elektromagnet (Fig. 76) und der Prüfungsspule *C* an der Biegung des Kernes bei aufliegendem und hinweggenommenem Anker gewonnenen Ergebnisse sind in der hier in Frage kommenden Beziehung sehr bezeichnend. Wurde der Anker genähert, so vervielfältigte er die gesammte magnetische Strömung zehnfach bei Anwendung schwacher Ströme und nahezu dreifach bei starken Strömen. Dagegen liefert ein stählernes Hufeisen, das ein für allemal magnetisirt worden ist, in der Biegung eine bestimmte Menge magnetischer Kraftlinien. Soviel man auch den Widerstand des magnetischen Kreises vermindert, es werden doch nicht mehr Kraftlinien hervorgerufen. Wird der Anker ab-

Digitized by Google

genommen, so treten die Kraftlinien nicht allein an den Enden des Hufeisens, sondern auch von seinen Seiten heraus; alle magnetischen Kraftlinien zerstreuen sich nach irgend einer Richtung hin. Wird der Anker angelegt, so treten die magnetischen Kraftlinien nicht so leicht in den umgebenden Raum hinaus, sondern zum grossen Theil längs der Stahlschenkel und durch den Eisenanker. Bei einer noch so beträchtlichen Zerstreuung erlangt man nicht eine Kraftlinie mehr in dem gebogenen Theil. Es besteht durchaus die nämliche Zahl von Kraftlinien im gebogenen Theil, ob der Anker aufliegt oder nicht. Durch die Verminderung des magnetischen Widerstandes wird die gesammte Zahl Linien nicht vermehrt, weil man nicht unter dem Einfluss einer gleichbleibend wirkenden magnetisirenden Kraft arbeitet. Durch Anlegung des Ankers an einen stählernen Hufeisenmagnet sammelt man nur die magnetischen Kraftlinien, aber man vervielfacht sie nicht.

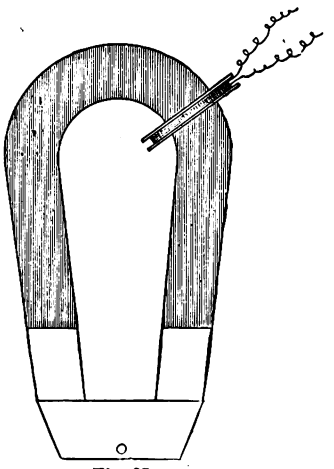


Fig. 87.

Verschiedene meiner Zuhörer haben Versuche in folgender Weise angestellt. Sie benutzten den in Figur 87 dargestellten Hufeisenmagnet, dessen Länge von Ende zu Ende durch den Stahl gemessen $106^1/_2$ *cm* betrug; ein leichter Rahmen konnte über den Magnet geschoben werden. Auf den als Prüfungsspule dienenden Rahmen waren 30 Umwindungen feinen Drahtes aufgewickelt. Die Enden dieser Umwindungen wurden nach einem entfernten Theil des Laboratoriums geführt und mit einem empfindlichen ballistischen Galvanometer verbunden. Die Spule wird über den Magnet (oder über seinen Anker) zu irgend einer Stelle hin geschoben. Der Anker wird nun sacht auf die Pole gelegt und zur Beruhigung der Galvanometernadel genügende Zeit gelassen. Darauf wird der Anker plötzlich abgerissen. Die erste Schwingung misst die durch Hinwegnahme des Ankers bedingte Änderung der Zahl magnetischer Kraftlinien, die durch die Spule in der bestimmten Lage hindurchtreten.

Bei den Versuchen wurde die Wirkung Centimeter für Centimeter der Länge des Magnetes vermerkt. Befand sich die Prüfungsspule über dem Bogen, so betrug die Wirkung auf das

Digitized by Google

Galvanometer nicht den dreitausendsten Theil der Wirkung, die bei Anlegung der Spule dicht am Pole sich zeigte. Wir sind deshalb zu dem Schlusse berechtigt, dass die Zahl der magnetischen Kraftlinien in einem dauernd magnetisirenden Hufeisenmagnet aus Stahl durch die Gegenwart oder Abwesenheit des Ankers nicht geändert wird.

Es wurde erwähnt, dass der Anker stets sacht angelegt worden ist.

Man darf den Anker nicht heftig anschlagen lassen, andernfalls vernichtet man etwas vom Dauermagnetismus. Dagegen darf man den Anker so rasch wie möglich abreissen. Letzteres ist eher von Vortheil für den Magnet als nachtheilig. Viel verbreitet ist die Meinung, man dürfe den Anker eines Magnetes nicht plötzlich abreissen. Die Sache verhält sich jedoch umgekehrt. Schnelles Abreissen des Ankers ist gestattet, er darf aber nie plötzlich fest anschlagen.

Ein weiterer Unterschied zwischen einem Dauermagnet aus Stahl und einem Elektromagnet ist in folgender Thatsache zu finden: Man nehme zwei solche Magnete, beide von Hufeisenform und von gleicher Abmessung. Der Elektromagnet werde gerade so stark erregt, dass seine Zugkraft auf einen eisernen Anker bei der Berührung gleich jener des Dauermagnetes sei. Wenn nun die Anziehung der nämlichen Magnete auf den in geringem Abstande befindlichen Anker geprüft wird, so findet man, dass der Dauermagnet einen beträchtlich grösseren Zug ausübt als der Elektromagnet. Bei gleicher Tragkraft besitzt der Stahlmagnet einen grösseren Wirkungsbereich.

Elektromagnete für grösste Tragkraft.

Dieselben wurden schon im Kapitel IV behandelt; die charakteristische Eigenschaft aller für Anziehung bei Berührung geeigneten Formen bildet der gedrungene magnetische Kreis.

Man hat mehrfach vorgeschlagen, die Stärke von Elektromagneten dadurch zu erhöhen, dass man sie mit Eisenmassen ausstattet, die zwischen dem inneren Kern und der Aussenseite, abwechselnd mit den Lagen der Umwindungen liegen. Alle diese Bauarten haben sich als irrig erwiesen. Das Eisen wird weit besser entweder ganz in der Spule oder ganz ausserhalb der Spule angebracht, so dass es selbst einen Theil des magnetischen Kreises bildet. Die Bauarten, die als Magnete von Camacho und

Digitized by Google

Cance bekannt sind und eine Bauart, die S. A. Varley im Jahre 1877 patentirt wurde, gehören zu dieser fehlerhaften und veralteten Anordnung.

Eine andere Bauart, die zeitweise als Neuigkeit zu Tage gefördert wird, besteht in der Benutzung eiserner Windungen aus Draht oder Streifen an Stelle kupferner Windungen. Die geringe elektrische Leitungsfähigkeit des Eisens bewirkt im Vergleich mit Kupfer nur Mehraufwand von Energie. Um mittels einer eisernen Drahtspirale gleiche magnetisirende Kraft zu erzielen, müssen ungefähr sechsmal soviel Watt, als für eine kupferne Wickelung nothwendig sind, aufgewendet werden.

Die letzte Probe dieser Bauart ist der Elektromagnet von Ricco[1]). Er besteht aus einem einzigen Streifen biegsamen Eisens, das über einen Eisenstab gerollt ist. Zwischen den Spiralgängen des Eisenstreifens sind Streifen geölten Papiers zur Isolirung der einzelnen Windungen gelegt. Das Ganze wird durch isolirte Ringe zusammengehalten.

Elektromagnete für die grösste Anziehung in die Ferne.

Im Kapitel V sind schon die Grundsätze niedergelegt worden, die uns in den Stand setzen, Elektromagnete für die Wirkung in die Ferne zu entwerfen. Wir brauchen einen Elektromagnet, der seine Kraft in einem möglichst grossen Luftzwischenraum äussert. Ein solcher Magnet muss eine sehr grosse magnetisirende Kraft, und viele Ampère-Windungen besitzen, damit die erforderliche Zahl magnetischer Kraftlinien durch den Luftwiderstand treten kann. Ebenso ist einleuchtend, dass die Pole nicht zu sehr einander genähert sein dürfen, weil sonst die magnetischen Kraftlinien von einem Pol zum andern unmittelbar übertreten und so zu sagen kurz geschlossen werden. Es muss zwischen den Polen ein grösserer Abstand bestehen als für Elektromagnete, deren Wirkung auf Tragkraft berechnet ist, erwünscht ist.

Elektromagnete ohne Eisen.

Wird der Eisenkern eines Elektromagnetes weggelassen, so zieht die vom Strom durchflossene Spirale Eisenstücke an; ihre

1) Mem. R. Acad. Sci. Modena, cr. 2, vol. IV, S. 27, 1886.

Digitized by Google

Wirkung ist indessen viel schwächer, als wenn ein Eisenkern vorhanden ist. Der besondere Fall, in dem eine lange röhrenförmige Spule einen eisernen Kern in sich hineinzieht, wird im Kapitel VIII erörtert. Diese Anordnung zeigt einige wichtige charakteristische Eigenthümlichkeiten, besitzt im Besonderen einen ausgedehnten Wirkungsbereich.

Elektromagnete von geringstem Gewichte.

Handelt es sich um den Entwurf eines Apparates, der an Bord eines Schiffes oder Ballons aufzustellen ist, wo das Gewicht in erster Linie in Anschlag gebracht werden muss, so findet wiederum ein Unterschied Statt. Es kommen drei Dinge in Betracht — Eisen, Kupfer und der elektrische Strom. Der Strom kommt für das Gewicht nicht in Frage; wenn wir deshalb am Gewicht sparen wollen und verhältnissmässig wenig Eisen anwenden, so bedarf es doch einer genügenden Kupfermasse, die den elektrischen Strom zu leiten vermag, wenn man auch unter solchen Umständen keine Sorge darauf zu verwenden braucht, ob sich der Draht beim Durchgang des stärksten Stromes bis zur Rothglut erhitzt. Man wende so wenig Kupfer an, als der Sachlage nach möglich ist, man stelle auch die Wirthschaftlichkeit in diesem Falle der Erreichung des Zweckes nach; jedoch ist für die Isolation anstatt Baumwolle oder Seide feuerfestes Material z. B. Asbest, zu verwenden.

Elektromagnete bei geringsten Beschaffungskosten.

Zur Herabminderung der ersten Herstellungskosten haben einige Fabrikanten Gusseisen anstatt Schmiedeeisen benutzt. Bei Herstellung grosser Elektromagnete, die als Feldmagnete in Dynamomaschinen verwendet werden, erzielt man dann eine Ersparniss, wenigstens in Fällen, in denen eine besonders grosse Masse und grosses Gewicht zulässig sind. Bei Herstellung kleinerer Formen, wie z. B. für Magnete in Weckern, ist Gusseisen nicht zu empfehlen. Schmiedbares Gusseisen ist für solche Zwecke in Anwendung gekommen. Der Verfasser hat zuerst das sog. Mitis[1]) Metall für Kerne empfohlen. Es ergibt sich sogar ein sehr geringer Vortheil in diesem Falle, da die Ersparniss bei der

1) Gusseisen mit einem Zusatz von Aluminium.

Digitized by Google

Benutzung von Eisen einer billigeren und geringeren magnetischen Beschaffenheit praktisch durch das Bedürfniss einer grösseren Kupfermasse aufgewogen wird. Die Arbeit kommt aber auch bei den Kosten der Herstellung in Betracht; man hat deshalb Formen gesucht, die am wenigsten Arbeit zu ihrer Herstellung erfordern. Eine solche Form hat sich im Handel eingeführt, und zwar der von Du Moncel als „aimant boîteux, oder einschenkelige Magnet (Fig. 24) bezeichnete. Dieser Magnet bildet ein Hufeisen mit nur einer Spule auf dem einen Schenkel; der andere Schenkel trägt keine Wickelung. Der Vortheil dieser Bauart besteht meiner Ansicht nach darin, dass Arbeit erspart wird, denn der Draht braucht nur auf einen Schenkel gewickelt zu werden Ob eine Verbesserung in anderer Hinsicht vorliegt, ist eine Frage, die durch Versuche zu entscheiden ist; vielleicht lässt sich durch die Theorie einige Auskunft geben. Nach Du Moncel, der viele Versuche mit dieser Magnetform angestellt hat, besteht bei gleichem Kupfergewicht eine geringe Abnahme der Kraft im einschenkeligen Magnet. Jedenfalls lassen sich bei einem gegebenen Kupfergewicht nicht soviel Windungen auf einer Spule aufbringen, als auf zwei Spulen, weil die äusseren Umwindungen der einen Spule grösser sind als die mittlere Grösse der Umwindungen bei Verwendung von zwei Spulen. Die Zahl der Ampère-Windungen bei gegebenem Kupfergewicht wird also etwas geringer, und wir würden stärkeren Strom gebrauchen, um die magnetisirende Kraft auf den nämlichen Werth zu bringen, wie bei Anwendung von zwei Spulen. Die eine Spule lässt sich aber etwas billiger als zwei herstellen. Solche Elektromagnete werden wegen ihrer Billigkeit und gedrungenen Form in Fallscheibentafeln vielfach verwendet. Das Joch kann etwas kürzer hergestellt, die beiden Kerne können näher zusammengebracht werden, als dies bei Elektromagneten mit zwei Spulen ausführbar ist. Mithin wird auch die Länge des magnetischen Kreises etwas verkürzt.

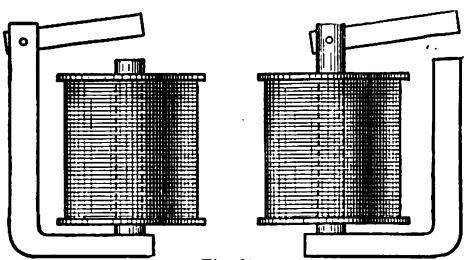


Fig. 88.

Zur Ermittelung, ob der Elektromagnet besser arbeitete, wenn der Anker seinen Drehpunkt an dem einen oder anderen Pol besitzt, stellte Du Moncel verschiedene Versuche an und

Digitized by Google

fand, dass die beste Wirkung sich ergibt, wenn der Anker an dem Schenkel befestigt wird, der von der Wickelung umgeben ist. Du Moncel machte Versuche, indem er Wickelungen am einen oder anderen Schenkel erprobte, wobei der Anker in jedem Falle in gleichen Abstand gebracht wurde. In dem einen Falle betrug der Zug 35 *g*, wenn der Anker an dem freien Schenkel sich befand, und 40 *g*, wenn er an dem Schenkel drehbar befestigt war, der die Wickelung trug. (Fig. 88).

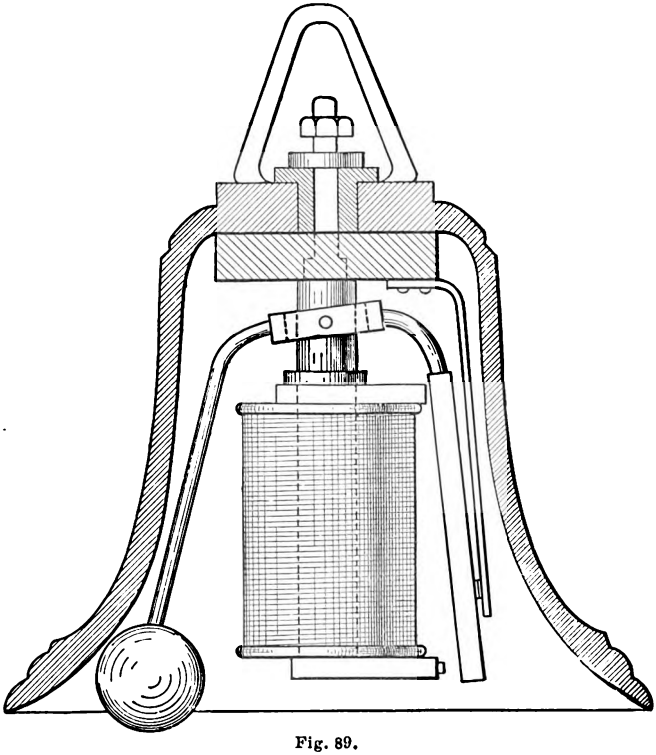


Fig. 89.

Eine andere Elektromagnetform mit nur einer Wickelung wird in Weckern, deren Glocke nach dem Muster der Kirchenglocken gestaltet ist, benutzt. H. Jensen hat diese Form angegeben. Ein gerader cylindrischer Kern mit Wickelung nimmt die Mitte der Glocke ein. Nachdem die Wickelung an ihren Platz gebracht ist, wird ein ovales Polstück, oder bei einigen anderen Formen werden zwei Polstücke auf die Enden des Kernes geschraubt. Die Polstücke verlängern auf diese Weise den magnetischen Stromkreis bis zu dem äussersten Umfang der Wickelung

Digitized by Google

und bilden einen magnetischen Zwischenraum einer Seite der Wickelung entlang. Der Anker besteht aus einem rechteckigen Streifen weichen Eisens von ungefähr derselben Länge wie der Kern. Er wird an dem einen Ende durch das eine, an dem anderen Ende durch das andere Polstück angezogen. (Fig. 89).

Elektromagnete zum Gebrauch bei schnell veränderlichen Strömen.

Will man einen Elektromagnet zum Gebrauch bei schnell veränderlichen Strömen herstellen (gleichgerichtete Ströme oder Wechselströme), so muss das Eisen geblättert werden, dass innere Wirbelströme nicht eintreten können Für alle schnell arbeitenden elektromagnetischen Apparate ist es von Vortheil, wenn das Eisen nicht massiv ist. Bei Telegraphenapparaten ist es nicht gebräuchlich, die Eisenkerne in der Weise in Blätter zu theilen, dass man sie aus Bündeln von Eisenplatten oder Drähten herstellt, sondern die Kerne werden häufig aus Röhren gebildet. In den cylindrischen Kern wird in der Mitte eine Höhlung gebohrt und die so gebildete Röhre der Länge nach aufgeschlitzt, um den Verlauf von Strömen in der Röhre zu hindern. Sollen Elektromagnete für rasch wechselnde Ströme, wie solche für elektrisches Licht geeignet sind und deren Wechselzahl gewöhnlich ungefähr 100 in der Sekunde beträgt, verwendet werden, so reicht das Aufschlitzen der Kerne zum Schutz gegen Wirbelströme nicht aus.

Alle erforderlichen Anweisungen hinsichtlich dieses Gegenstandes sind im Kapitel XI enthalten. Es soll hier noch erwähnt werden, dass eine Art elektromagnetischer Trägheit, oder selbstinductorischer Eigenschaft des elektrischen Kreises besteht, in Folge deren die Ströme später ansteigen und abfallen, als die elektromotorischen Kräfte, von denen sie erzeugt worden sind. In allen diesen Fällen wird der vom Stromkreise gebotene scheinbare Widerstand durch den Widerstand des Leiters und die Induction bedingt. Diese beiden Ursachen suchen den Strom herabzumindern, auch sucht der magnetische Widerstand eine Verzögerung des Stromes herbeizuführen. Da das Kapitel XI zur Behandlung der Apparate für Wechselstrom bestimmt ist, so ist es ausreichend, wenn zunächst intermittirende Ströme, wie man sie in der Telegraphie benutzt, behandelt werden.

Digitized by Google

Elektromagnete für schnellste Wirkung. Formel von Helmholtz.

Die Untersuchungen von Hughes über den für schnelle Signalgebung am besten geeigneten Elektromagnet sind schon erwähnt worden. Ebenso ist bereits erwähnt worden, dass bei Verwendung schnell veränderlicher Ströme die Stromstärke nicht so sehr durch den Widerstand des elektrischen Kreises als vielmehr durch seine elektrische Trägheit bestimmt wird. Es ist nicht sehr leicht, genau auseinander zu setzen, was in einem elektrischen Kreise vorgeht, wenn der Strom plötzlich angelassen wird. Denn der Strom steigt nicht plötzlich auf seinen vollen Werth, weil er durch die Trägheit verzögert wird. Das Ohm'sche Gesetz in seiner einfachen Form ist nicht länger anwendbar; die Formel von Helmholtz liefert uns einen Ausdruck für den Werth der Stromstärke zu irgend einer Zeit t nach der Entstehung des Stromes. Die Stärke eines Stromes nach Verlauf einer kurzen Zeit t kann man nicht durch die Division der elektromotorischen Kraft durch den Widerstand ausrechnen, dies lässt sich nur für stetige Ströme bewirken.

Die Formel lautet:

$$i = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right).$$

In dieser Formel bedeutet i die Stärke des Stromes nach Verlauf einer Zeit t, E die elektromotorische Kraft (Volt), R den Widerstand des ganzen Kreises (in Ohm), L den Coefficienten der Selbstinduction (in Quadranten) und e die Basis des natürlichen Logarithmensystems. In seiner allgemeinen Form ist der Ausdruck dem Ohm'schen Gesetz ähnlich, aber mit einem neuen Factor behaftet, nämlich dem Ausdruck, den die Klammer enthält. Dieser Factor besteht aus der Einheit minus einer gewissen Exponentialgrösse. Wenn der Factor in der Klammer eine Grösse kleiner als eins ist, so bedeutet dies, dass i kleiner ist, als $\frac{E}{R}$.

Zur Klarlegung ist es zweckmässig, einige Werthe auszurechnen und sie als Curve darzustellen. Dementsprechend wollen wir folgenden Fall nehmen. E sei = 10 Volt, R = 1 Ohm; der Coefficient der Selbstinduction L sei = 10 Quadranten. Dann ergibt sich:

1) Der Quadrant, ehemals Secohm genannt, ist die Einheit, in der der Coefficient der Selbstinduction auszudrücken ist. Amerikanische Elektriker nennen ihn Henry.

Digitized by Google

t (sec)	$e + \frac{R}{L}t$	i
0	1	0
1	1,105	0,950
2	1,221	1,810
5	1,649	3,936
10	2,718	6,343
20	7,389	8,646
30	20,08	9,501
60	403,4	9,975
120	162800,0	9,999

Berechnet man nach dem Ohm'schen Gesetz den stetigen Strom, so ergibt sich $\frac{10}{1} = 10$ Ampère. Die Formel von Helmholtz zeigt, dass bei der vorausgesetzten grossen Selbstinduction von 10 Quadranten die Stromstärke am Ende der 30. Sekunde erst auf etwa 95 Prozent ihres Endwerthes angestiegen ist, und erst am Ende der zweiten Minute hat der Strom praktisch die volle Stärke erreicht. Diese Werthe sind in der Fig. 90 als oberste Curve gezeichnet. In der Figur ist indessen vorausgesetzt, dass die Zahl der Windungen S in der Wickelung eines Elektromagnetes 100 beträgt, sodass, wenn der Strom seinen vollen Werth von 10 Ampère erreicht, die magnetisirende Kraft $Si = 1000$ ist. Es sei noch bemerkt, dass die Curve von Null zunächst steil und nahezu in gerader Linie ansteigt, dann umbiegt und wieder nahezu gerade wird, wenn sie allmählich zu ihrem Grenzwerth ansteigt. Der erste Theil der Curve — der sich auf die Stromstärke nach sehr kleinem Zeitzwischenraume bezieht — ist der Abschnitt, innerhalb dessen die Stromstärke mehr durch die Trägheit (d. i. Selbstinduction) als durch den Widerstand bestimmt wird, sodass für sehr kleine Werthe von t die Formel näherungsweise geschrieben werden kann:

$$i = \frac{Et}{L}$$

d. h. die Wirkung der Selbstinduction während der ersten kleinen Zeiträume ist derart, als ob der einzige Widerstand in dem Stromkreise gleich wäre den Quadranten der Selbstinduction dividirt durch den kleinen Bruchtheil einer Sekunde, der ver-

Digitized by Google

flossen ist $\left(\frac{L}{t}\right)$. Nun ist die Division durch einen kleinen Bruchtheil gleichwerthig der Vervielfachung mit einer grossen Zahl. Die Wirkung während der ersten Augenblicke ist dann die nämliche, als wäre ein ausserordentlich hoher Widerstand vorhanden, der sich mit dem Fortschreiten der Zeit vermindert.

(Zusatz des Übersetzers.) Zur Erklärung der Ableitung der Formel von Helmholtz diene Folgendes:

Wirkt in einem Stromkreise keine Selbstinduction, so lautet das Gesetz von Ohm zu jeder Zeit des Stromverlaufes

$$E = Ri$$

Ändert sich aber die Stromstärke i in der unendlich kleinen Zeit dt um den Betrag di und bedeutet L den Coefficienten der Selbstinduction, so ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduction $= L\frac{di}{dt}$ so dass

$$E - L\frac{di}{dt} = Ri$$

d. h. die Selbstinduction, die als Widerstand zu jeder Zeit des Stromverlaufes wirkt, vermindert die Spannung E.

Durch einige Umformungen erhält man

$$-\frac{di}{\frac{E}{R} - i} = -\frac{R}{L}dt$$

Integrirt man beide Seiten dieser Gleichung, so folgt:

$$\text{log. nat.}\left(\frac{E}{R} - i\right) = -\frac{R}{L}t + C$$

wenn C die Integrationsconstante bedeutet. Der Werth von C bestimmt sich aus der Bedingung, dass zu Beginn des Stromschlusses, wenn also $t = 0$ ist, auch $i = 0$ ist. Setzt man für t und i in die letzte Gleichung den Werth 0 ein, so folgt:

$$C = \text{log. nat.}\frac{E}{R}$$

und nach Einsetzung dieses Werthes in die Gleichung

$$\text{log. nat.}\left(\frac{E}{R} - i\right) = -\frac{R}{L}t + \text{log. nat.}\frac{E}{R}$$

Daraus erhält man:

$$\text{log. nat.}\frac{\frac{E}{R} - i}{\frac{E}{R}} = -\frac{R}{L}t$$

Digitized by Google

ferner

$$\frac{\frac{E}{R} - i}{\frac{E}{R}} = e^{-\frac{R}{L}t}$$

wenn e die Basis des natürlichen Logarithmensystems ($= 2{,}71828$) bedeutet.

Aus der letzten Gleichung folgt als Werth für i

$$i = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

Zeitconstanten von Elektromagneten.

Vorhin war bemerkt worden, dass im ersten Zeitraum nach dem Beginn des Stromes dessen Stärke mehr durch die Selbstinduction des Kreises als durch seinen Widerstand bestimmt wird. In Wirklichkeit wird die Stromstärke weder durch die Selbstinduction noch durch den Widerstand allein bestimmt, sondern durch das Verhältniss der beiden Grössen $\left(\frac{L}{R}\right)$. Dieses Verhältniss wird oft als die „Zeitconstante" des Stromkreises bezeichnet, denn es stellt die Zeit vor, die der Strom gebraucht, um zu einem bestimmten Bruchtheil seines Endwerthes anzusteigen. Dieser bestimmte Bruchtheil ist der Bruch $\frac{e-1}{e}$;[1]) oder 0,634. Alle Curven des ansteigenden Stromes sind im Allgemeinen ähnlich — sie unterscheiden sich nur im Massstabe, das heisst, sie unterscheiden sich nur in Betreff der Höhe, zu der sie schliesslich ansteigen, sowie in der Zeit, die sie brauchen, um diesen Bruchtheil ihres Endwerthes zu erreichen.

1. Beispiel. $E = 10$ $R = 400$ Ohm, $L = 8$. Der Endwerth der Stromstärke wird 0,025 Ampère oder 25 Milliampère sein. Dann ist die Zeitconstante $^8/_{400} = {}^1/_{50}$ Sekunde.

2. Beispiel. Das Postoffice-Normal „A"-Relais besitzt einen Widerstand $R = 400$ Ohm; L ist $= 3{,}25$. Das Relais arbeitet bei 0,5 Milliampère Stromstärke und wird deshalb mit 5 Daniellzellen in einer Leitung von 9600 Ohm Widerstand ansprechen. Unter diesen Umständen beträgt die Zeitconstante des Apparates bei kurzem Schluss 0,0081 Sekunden.

---

1) Anmerkung. Für jeden Stromkreis ergibt sich der gleiche Werth der Stromstärke, wenn in dem Factor $1 - e^{-\frac{R}{L}t}$ der Exponent $\frac{R}{L}t = 1$ gesetzt wird. Dieser Werth ist $1 - \frac{1}{e}$ oder $\frac{e-1}{e} = 0{,}634$. Aus $\frac{R}{L}t = 1$ folgt $\frac{L}{R} = t$.

Digitized by Google

Die Zeitconstante eines Stromkreises kann entweder durch Verringerung der Selbstinduction oder durch Erhöhung des Widerstandes ermässigt werden. In der Fig. 90 ist die Lage der Zeitkonstante für die obere Curve durch die senkrechte punktirte Linie bei 10 Sekunden bezeichnet. Der Strom braucht 10 Sekunden um bis 0,634 seines Endwerthes anzusteigen. Die Verzögerung des Ansteigens des Stromes wird durch den Einfluss der Drahtspiralen und der Elektromagnete im Stromkreise bedingt. Der Strom verzögert sich beim Anwachsen, weil er magnetische Felder in den Spulen zu erzeugen hat und dadurch entgegengesetzte elektromotorische Kräfte erregt, die das plötzliche Ansteigen auf seine volle Stärke verhindern. Die mit Helmholtz's Formel nicht bekannten Elektriker waren der Ansicht, es entstehe eine Verzögerung in dem Eisen der Elektromagnetkerne. Ein Eisenkern könne nicht plötzlich magnetisirt werden, er brauche Zeit zur Erlangung des Magnetismus. Man glaubte, dies sei eine Eigenschaft des Eisens. Wir wissen aber, dass die einzige wirkliche Zeitverschiebung in der Magnetisirung des Eisens — das, was besonders bekannt ist als „die sog. zähe Hysteresis" — keinen irgendwie bedeutenden Prozentsatz vom gesammten Betrage der Magnetisirung ausmacht, dass sie verhältnissmässig lange Zeit braucht, um sich zu zeigen und deshalb nicht die Ursache der betrachteten Verzögerung sein kann.

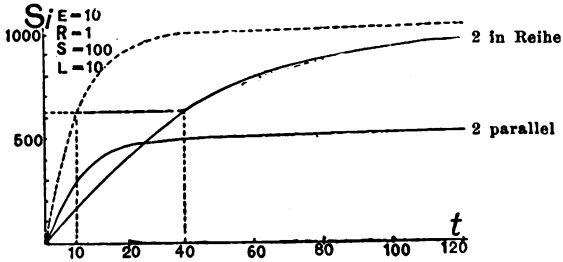


Fig. 90.

Es gibt auch Elektriker, nach deren Ansicht bei plötzlicher Magnetisirung eines Eisenstabes Inductionsströme, die in dem Eisen entstehen, der Magnetisirung Widerstand leisten und diese verlangsamen. Dass diese Ströme der Magnetisirung widerstehen, trifft zu; wenn man aber Eisen so sorgfältig blättert, dass die Wirbelströme beseitigt werden, so findet man dennoch, dass, obwohl der Magnetismus schneller als vorher ansteigt, der Strom noch langsamer bis zu seiner Endgrösse zunimmt. Durch die Blätterung des Eisens wird die selbstinductorische Wirkung vermehrt und die Zeitconstante des Stromkreises nimmt zu. Die Verzögerung

Digitized by Google

ist nicht in dem Eisen, sondern in dem magnetisirenden Strome begründet.

Elektriker des Festlandes unterscheiden zuweilen zwischen der „veränderlichen“ und der „stetigen“ Periode des Stromes; mit dem ersten Ausdruck bezeichnen sie die Zeit, während deren der Strom noch ansteigt, und mit dem letzteren die Zeit, nach der der Strom angestiegen ist. Eine feste Grenzlinie zwischen den beiden Zeitabschnitten lässt sich jedoch nicht ziehen, denn der Strom erreicht seinen Endwerth in unmerkbaren kleinen Stufen. Das Ohm'sche Gesetz gilt nur für den stetigen Werth. So lange die Stromstärke merklich von ihrem stetigen Zustand abweicht, so lange muss sie als noch im veränderlichen Zustand befindlich angesehen werden. Für diesen Fall gilt die Formel vom Helmholtz.

Oft wird die Frage gestellt, ob ein langsam wirkender Elektromagnet, durch Neubewickelung mit einem Spulendraht von anderem Widerstande in seiner Wirkung beschleunigt werden kann. Die Antwort hängt von dem Widerstande und der Induction des übrigen Kreises ab. Bei vollkommener Isolation und einem gegebenen Raum, der durch die Umwindungen ausgefüllt werden soll, ist die Änderung der Zeitconstante des Elektromagnetes durch Änderung der Umwickelung nicht möglich. Denn in einer Wickelung von gegebenem Volumen ist sowohl der Widerstand wie auch die Selbstinduction proportional dem Quadrate der Windungszahl; das Verhältniss der beiden zu einander bleibt daher dasselbe und ist unabhängig von der Drahtstärke. Wenn aber ein Elektromagnet in einer langen Leitung verwendet wird, die keine weiteren Spulen oder Elektromagnete enthält, und die trotz ihrer geringen Selbstinduction einen beträchtlichen Widerstand besitzt, so kann es vortheilhaft wirken, wenn man den Elektromagnet mit dickerem Drahte von einigen Umwindungen neu bewickelt, und so die Zeitconstante des Stromkreises im Ganzen vermindert. Von Betz[1]) zeigte, dass, obgleich die Stromstärke und der Endwerth des Magnetismus in jedem Falle der nämliche sei, der Magnetismus des Elektromagnetkernes sich rascher durch eine hohe elektromotorische Kraft entwickelt, wenn sie in einem grossen Widerstand wirkt, als wenn eine geringere Kraft in einem kleineren Widerstande wirkt. Wenn die erforderliche Vorsorge getroffen würde, die Batterie so zu ändern, dass die Stromstärke auf demselben End-

1) Über einige frühere Versuche von Hipp siehe Mittheilungen der Berner naturforschenden Gesellschaft 1885, S 190.

Digitized by Google

werth sich hält, so würde die Zeitconstante des Stromkreises durch Vergrösserung des Widerstandes verkleinert.

Ueber die Verbindung der Spulen für schnellste Wirkung.

Wir wollen diese wichtigen, aber verwickelten Betrachtungen auf die praktische Aufgabe über Herstellung rasch arbeitender Elektromagnete anwenden. Ein Elektromagnet bilde einen Theil des Empfangsapparates eines telegraphischen Systems, mit dem schnell gearbeitet werden soll. Die beiden auf die Hufeisenkerne gewickelten Drathspiralen seien hintereinander verbunden. Der Coefficient der Selbstinduction ist viermal so gross, als derjenige einer einzelnen Spule, da die Coefficienten der Selbstinduction dem Quadrate der Anzahl Drahtwindungen proportional sind, die einen gegebenen Kern umschliessen. Wenn die beiden Spulen anstatt in Hintereinanderschaltung in Nebeneinanderschaltung gebracht werden, so sinkt der Coefficient der Selbstinduction auf denselben Werth, als ob nur eine einzige Wickelung vorhanden wäre, weil der halbe Strom in der Leitung (der praktisch genommen, keine Veränderung erfährt) durch jede Spule gehen wird. Deshalb beträgt die Zeitconstante des Stromkreises in nebeneinander geschalteten Spulen den vierten Theil der Zeitconstante, die bei Hintereinanderschaltung der Wickelung vorhanden ist. Andererseits beträgt bei gegebenem Linienstrom die magnetisirende Kraft der beiden Spulen in Nebeneinanderschaltung nur die Hälfte von der Kraft, die bei Hintereinanderschaltung der Spulen entsteht. Die beiden untersten Curven in Fig. 90 stellen dies dar. Aus ihnen ist ersichtlich, dass für sehr kurz andauernde Ströme die magnetisirende Kraft grösser ist, wenn die zwei Spulen nebeneinander geschaltet werden, als wenn sie in Hintereinanderschaltung vereinigt sind.

Dieser Umstand war den Telegrapheningenieuren schon früher bekannt. Die Erklärung, die über den Vortheil der Parallelschaltung der Spulen gewöhnlich gegeben wird, halte ich aber für unrichtig; dass nämlich die in den beiden Spulen entstehenden „Extraströme“ (d. h. die von der Selbstinduction herrührenden Ströme) in solcher Richtung inducirt werden, dass sie sich in hintereinander geschalteten Spulen unterstützen, dagegen sich bei Nebeneinanderschaltung der Spulen ausgleichen. Dies ist unrichtig, denn in keinem Falle findet Ausgleichung statt. Wie auch der

Digitized by Google

Strom zur Erzeugung des Magnetismus fliesst, in der Drahtspirale wird das Ansteigen des Stromes durch den sogenannten Extrastrom gehemmt, während der Extrastrom das Abfallen des Stromes ebenfalls hindert, den Strom in seinem Bestehen also unterstützt. Steigt der Strom in beiden Spulen im nämlichen Augenblick an, so wirkt die Selbstinduction — seien die Spulen hintereinander oder nebeneinander geschaltet — verzögernd auf das Ansteigen des Stromes ein. Der Vortheil der Parallelgruppirung besteht einfach darin, dass sie die Zeitconstante verkleinert.

Batterieschaltung zur Erzielung der schnellsten Wirkung.

Die Frage der Batterieschaltung kann vom nämlichen Gesichtspunkt aus betrachtet werden. In welcher Weise bedingt schnelles Arbeiten und die Zeitconstante die beste Art der Batterieschaltung? Die Regel, nach der die Batterie so anzuordnen ist, dass ihr innerer Widerstand dem äusseren gleich wird, liefert ein unrichtiges Ergebniss. Die vermeintlich beste Anordnung liefert (sogar bei Preisgabe der Wirthschaftlichkeit) nicht das beste Ergebniss, das von einer bestimmten Anzahl Zellen erhalten werden kann. Es möge dies an einem graphisch dargestellten Beispiel erläutert werden. Eine Leitung und der eingeschaltete Elektromagnet haben zusammen einen Widerstand von 6 Ohm; zur Verfügung stehen 24 kleine Daniell'sche Zellen, jede mit einer elektromotorischen Kraft von 1 Volt und einem inneren Widerstand von 4 Ohm. Der Coefficient der Selbstinduction des Elektromagnetes und des Stromkreises beträgt 6 Quadranten. Wenn die Zellen hintereinander geschaltet sind, so beträgt der Widerstand der Batterie 96 Ohm, der Gesammtwiderstand des Stromkreises 102 Ohm und der volle Werth des Stromes 0,235 Ampère. Sind die Zellen nebeneinander geschaltet, so beträgt der Widerstand der Batterie 0,133 Ohm, der Gesammtwiderstand 6,133 Ohm und der volle Werth des Stromes wird 0,162 Ampère sein. Entsprechend der Regel, nach der der Widerstand der Batterie gleich dem äusseren Widerstand sein soll, müssten man die Batterie so schalten, dass je 4 Zellen nebeneinander und 6 Gruppen hintereinander geschaltet werden. Dann betrüge der innere Widerstand der Batterie 6 Ohm, der Gesammtwiderstand des Stromkreises 12 Ohm und der volle Werth des Stromes 0,5 Ampère. Die Zeitconstante des Stromkreises (Selbstinductions-Coefficient

Digitized by Google

dividirt durch den Gesammtwiderstand) stellt sich bei der Hintereinanderschaltung auf 0,06 Sekunden, bei der Nebeneinanderschaltung auf 0,96 Sekunden, bei der gemischten Schaltung für den stärksten stetigen Strom auf 0,5 Sekunden. Nach diesen Angaben sind die in Fig. 91 dargestellten drei Curven gezeichnet. Die Abscissen geben die Zeit in Sekunden und die Ordinaten die Stromstärke an. Die punktirten, senkrechten Linien geben die Zeitconstante in den drei Fällen an. Man sieht, dass, falls schnelles Arbeiten verlangt wird, der magnetisirende Strom während kurzer Zeitzwischenräume schneller ansteigt, wenn die Zellen hintereinander geschaltet sind, als wenn sie für die grösste Leistung geschaltet werden.

Sind alle Zellen hintereinander geschaltet, sodass die Batterie einen grösseren Widerstand besitzt, als der übrige Theil des Stromkreises, so steigt der Strom mit Rücksicht auf die kleinere Zeitconstante schneller an, doch erreicht die Stromstärke nicht den maximalen Endwerth wie im andern Falle. Ist sowohl Selbstinduction als Widerstand im Stromkreise vorhanden, so gibt die Schaltung für grösste Stromstärke nicht die zweckmässigste Anordnung.

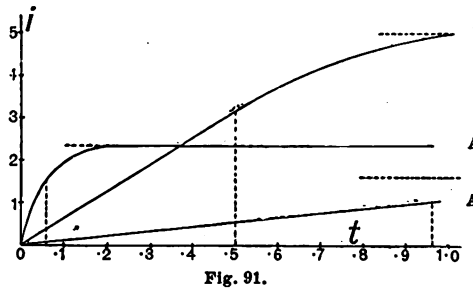


Fig. 91.

Die Aufgabe lässt sich noch aus einem andern Gesichtspunkt betrachten.

Beim Ansteigen des Stromes wirkt die Selbstinduction scheinbar wie eine Vergrösserung des Widerstandes; während der Abnahme des Stromes wirkt sie so, als ob eine Abnahme des Widerstandes Statt fände. Die Batterie ist deshalb so anzuordnen, dass der innere Widerstand dem wahren Widerstand des Stromkreises plus dem scheinbaren Widerstand während der fraglichen Zeit gleich wird. Es frägt sich also, wie gross der hinzukommende scheinbare Widerstand ist? Er ist proportional der Zeit, die verflossen ist, seitdem der Strom begonnen hatte. Es kommt dann also darauf an, wie lange Zeit wir mit dem Strome arbeiten wollen. Welchen Bruchtheil einer Sekunde braucht man zur Ab-

Digitized by Google

gabe eines Zeichens, oder wie gross ist der Betrag für den schwingenden Theil des Weckers? Die kurze Zeit, während deren der Strom ansteigen soll, sei t; dann ist der Widerstand zur Zeit t nach dem Stromschluss:

$$R_t = \frac{R \cdot e^{\frac{R_t}{L}}}{e^{\frac{R_t}{L}} - 1}$$

Zusatz des Übersetzers: Der Werth ergibt sich in folgender Weise: Die Stromstärke zu irgend einer Zeit beträgt:

$$i = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{E_t}{R}}\right)$$

Da nach dem Gesetz von Ohm die elektromotorische Kraft, dividirt durch den Widerstand, die Stromstärke ergibt, so bedeutet also der reziproke Werth des Faktors von E, oder der Werth $\frac{R}{1 - e^{-\frac{R}{L}t}}$ den Widerstand.

Aus diesem ergibt sich durch Umformung, indem man $\frac{1}{e^{\frac{R}{L}t}}$ für $e^{-\frac{R}{L}t}$ setzt, der obige Werth für den Widerstand.

Zeitconstanten von Elektromagneten.

Einige von Vaschy[1]) bewirkte Feststellungen des Selbstinductionscoefficienten von Elektromagneten in einer Anzahl telegraphischer Apparate mögen hier erwähnt werden.

	L. in Quadranten
Spulen, einzeln, ohne Eisenkerne . . .	0,233 und 0,265
„ einzeln. mit Eisenkern . . .	1, 65 und 1, 71
„ mit durch ein Joch vereinigten Kernen, Spulen in Hintereinanderschaltung .	6, 37
„ mit auf den Polen liegendem Anker .	16,68.

Zusatz des Übers.: Die im Telegraphen-Ingenieur-Bureau des Reichs-Postamts angestellten Messungen haben folgende Näherungswerthe ergeben:

Morseapparat (Normalfarbschreiber)	Quadranten
Zwei Spulen ohne Eisenkern hintereinander . . .	0,7
„ „ mit Eisenkern	9
„ „ „ „ aber Anker abstehend . .	13
„ „ „ „ aber Anker aufliegend . .	18

1) Bulletin de la société internationale des électriciens. 1886.

Digitized by Google

Hughes Apparat.

	Quadranten
Zwei Spulen mit Kern, Anker aufliegend . . .	29
„ „ „ „ aber Anker abgestossen . .	26

Mit der Vervollkommnung des magnetischen Kreises wächst demnach die Selbstinduction an.

Preece hat verschiedene Angaben über die Selbstinductionscoefficienten und den Widerstand der in der Britischen Verwaltung benutzten Apparate geliefert. Auf Grund dieser Angaben lässt sich die Zeitconstante dieser Apparate in einem gegebenen Stromkreise und die Zeit bestimmen, wie lange der Strom gebraucht, um zu einem bestimmten Bruchtheil seines Endwerthes anzusteigen Preece wies schon in einer früheren Nummer des „Journal of the Society of Telegraph Engineers", in einer Abhandlung über „Zweigwiderstände" nach, dass, je vollkommener der magnetische Kreis — und obwohl man mehr Magnetismus vom Strome erhält — desto mehr der Strom verzögert werde. Die Versuche waren sehr einfach. Der Ausschlag des Galvanometers wurde beobachtet, wenn der Stromkreis, der die Batterie und den Elektromagnet enthielt, geöffnet wurde. Die Unterbrechung wurde durch einen Schlüssel bewirkt, der im Augenblicke der Öffnung die Wickelung des Elektromagnetes mit dem Galvanometer verband. Der Ausschlag des Galvanometers sollte der Stärke des Extrastromes bei der Öffnung entsprechen. Die Fig. 92 zeigt einige Anordnungen der Versuche. Eine Spule eines Relais, die den Eisenkern enthielt, wurde mit der Batterie, dem Schlüssel und dem Galvanometer wie beschrieben in Verbindung gebracht. Der mit der einzelnen Spule erlangte Ausschlag bildete die Einheit; alle anderen Ergebnisse wurden damit verglichen. Verband man zwei Spulen so mit einander, wie sie gewöhnlich hintereinandergeschaltet sind, so betrug der Ausschlag 17. Wurde das eiserne Joch an den Kern gelegt, um die Hufeisenform herzustellen, so betrug der Ausschlag 496; das heisst das Bestreben des Elektromagnetes den Strom zu verzögern war 496 Mal so gross als das Bestreben der einfachen Spule. Nach Auflegung eines Ankers stieg die Wirkung

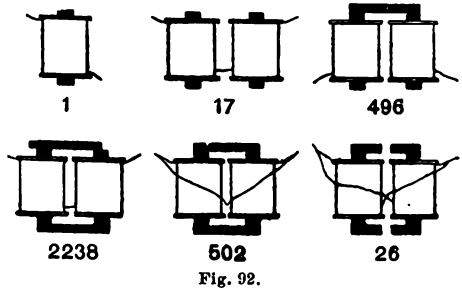


Fig. 92.

Digitized by Google

auf 2238. Die Nebeneinanderschaltung der Spulen ermässigte die Wirkung auf 502, also auf etwas weniger als den vierten Theil des Werthes, der erwartet worden war. Wurde schliesslich der Anker und das Joch in der Mitte getrennt, wie es bei allen Normalrelais der Britischen Verwaltung der Fall ist, so sank der Ausschlag des Galvanometers von 502 auf 26. Solche Relais arbeiten sehr schnell. Preece erklärt, dass mit dem alten Relais, das hohe Selbstinduction besass — der Galvanometerausschlag in Folge der Selbstinduction betrug 1688 —, die Geschwindigkeit der Zeichengebung schwankte zwischen 50 und 60 Wörtern in der Minute, wogegen mit den neuen Relais die Geschwindigkeit der Zeichengebung auf 400 bis 450 Wörter stieg.

Die Relais der Britischen Telegraphen-Verwaltung[1]).

Als Beispiel der Bauart schnellarbeitender Telegraphenapparate dienen vier Normalmuster für Relais, wie sie in der Britischen Telegraphen-Verwaltung im Gebrauche sind.

Das „*A*" Muster des Normal-Relais besitzt einen Elektromagnet, der in halber Grösse in Figur 93 abgebildet ist. Die eine Spule ist unbewickelt, die andere bewickelt dargestellt. Die amtliche Beschreibung lautet: „Das die Kerne bildende Eisen des Elektro magnetes ist aus einem massiven Stab besten schwedischen Eisens gefertigt und darf, wenn das Eisen gehörig ausgeglüht ist, keine Spur magnetischen Rückstandes zeigen, nachdem ein Strom von 50 Volt elektromotorischer Kraft durch die kurz geschlossene Wickelung gesandt worden ist". Es befinden sich vier Drähte von 5 Mils (= 0,005 engl. Zoll = 0,127 Millimeter) Durchmesser auf dem Elektromagnetpaar, von denen jeder Draht einen Widerstand von 100 Ohm, bei einer Temperatur von 15,6° Celsius (60° Fahrenheit) besitzen muss. Eine Abweichung von nicht mehr als ± ein Prozent ist gestattet. Diese Drähte müssen gleiche Länge besitzen, so dass sie elektromagnetisch differential wirken, wenn ein Strom von 50 Volt elektromagnetischer Kraft hindurchfliesst. Jedes Paar Drähte hat Enden von verschiedener Farbe (grün und weiss). In

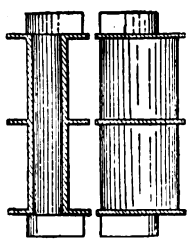


Fig. 93.

1) Der Verfasser ist dem Chef-Elektriker des Britschen Post-Telegraphen, W. H. Precce, Esq. F. R. S., für die Bekanntgabe der Einzelheiten dieser Apparate sehr verbunden.

Digitized by Google

der Vorschrift über die Prüfung der Apparate wird hinzugefügt: „Die Isolation der elektrisch getrennten Theile muss praktisch vollkommen sein. Diese Bedingung muss besonders in Betreff der Isolation zwischen den Umwindungen und den Kernen und zwischen den beiden Drähten der differential bewickelten Apparate, die nicht abgenommen werden sollen, wenn der Isolationswiderstand weniger als ein Megohm beträgt". Die Gesammtlänge des für das „*A*"-Relais verwendeten Drahtes beträgt 293 Meter (= 320 Yard); bei Hintereinanderschaltung aller Umwindungsdrähte stellt sich der Widerstand auf 400 Ohm und der Selbstinductionscoefficient auf 3,25 Quadranten.

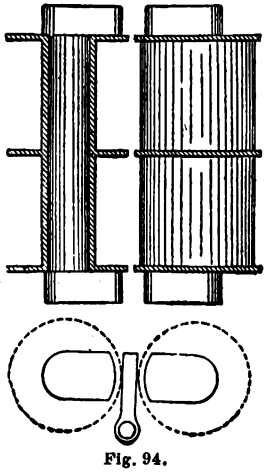


Fig. 94.

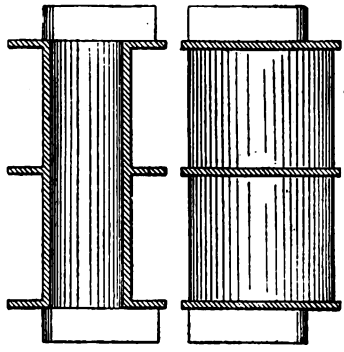


Fig. 95.

Das Muster „*B*" des Normal-Relais ist in der Figur 94 in halber natürlicher Grösse dargestellt. Das Relais ist in ähnlicher Weise mit 5 Mils (= 0,127 Millimeter) starkem Drahte bewickelt. Es sind zwei Drähte von je 293 Meter (= 320 Yard) Länge und 400 Ohm Widerstand vorhanden, aber die beiden Drähte werden nach der Aufwickelung nebeneinander geschaltet. Der Widerstand des Apparates beträgt 200 Ohm, der Selbstinductionscoefficient 2,14 Quadranten.

Das Muster „*C*" (Figur 95 in halber Grösse), das grösste Normal-Relais, ist mit Draht von 5 Mils (0,127 *mm*) von 878 Meter (960 Yard) Länge bewickelt, die Wickelung besitzt einen Widerstand von 1200 Ohm und einen Selbstinductionscoefficient von 26,4 Quadranten. Der Draht ist dreimal so lang und besitzt ungefähr neunmal soviel Selbstinduction als das Muster „*A*". Die

Digitized by Google

hinsichtlich der Kerne für das Muster „*A*“ erwähnten Anweisungen gelten auch für die Muster „*B*“ und „*C*“. In jedem dieser Apparate ist ein gebogener Dauermagnet (aus Wolframstahl) vorhanden, um die Ankerzungen, deren in jedem Apparat zwei vorhanden sind, zu polarisiren; die eine Zunge liegt zwischen den oberen, die andere zwischen den unteren Polstücken.

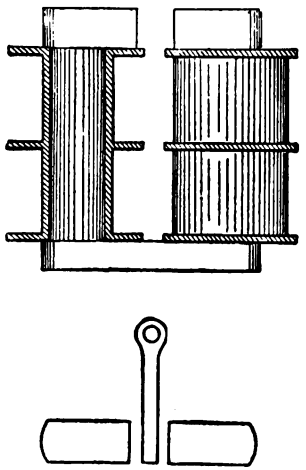


Fig. 96.

Die Figur 96 zeigt (in halber Grösse) die Form des von der Britischen Telegraphen-Verwaltung angenommenen Siemens'schen Relais. Es ist mit 590 Meter langem und 0,2 Millimeter starkem Drahte bewickelt, besitzt einen Widerstand von 400 Ohm und eine Selbstinduction von 7,09 Quadranten.

Elektromagnete von Higgins.

Die im automatischen Typendrucker der Exchange-Telegraphen-Compagnie benutzten Elektromagnete liefern ein anderes Beispiel besonderer Bauart für schnelles Arbeiten. Higgins behauptet[1]), dass Kerne, die im Verhältniss zu ihrem Durchmesser kurz sind,

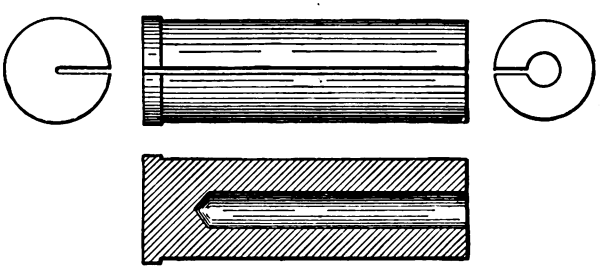


Fig. 97.

schneller als lange dünne Kerne arbeiten; dass auch vorstehende Enden und angehängte Polstücke fortzulassen seien, weil sie die Wirkung verzögern; und dass auch metallene Dämpfer oder Hülsen den Magnetismus gleichfalls verzögern. Die Kerne dieser Elektromagnete (Figur 97) werden aus einer sehr reinen Sorte Holzkohlen-Eisen in der Schweiz hergestellt. Auf ein Drittel des Durchmessers werden sie von der Grundfläche aus bis zu einem kurzen Abstande

1) Journal of the Society of Telegraph Engineers. Bd. VI. S. 129. 1877.

Digitized by Google

von der Polfläche ausgebohrt, dann in der Längsrichtung aufgeschlitzt und ausser Berührung mit der Luft ausgeglüht. Es werden flache Anker verwendet.

Einige Angaben über den im Relais von D'Arlincourt benutzten Elektromagnet sind im Kapitel IX enthalten.

Kurze Kerne im Gegensatz zu langen Kernen.

Bei Betrachtung der für schnelles Arbeiten am besten geeigneten Formen ist zu erwähnen, das die Wirkungen der Hysteresis in Folge deren Änderungen der Magnetisirung von Eisenkernen verzögert werden, bei nahezu geschlossenen magnetischen Kreisen viel bemerkbarer sind als bei kurzen Stücken. Elektromagnete, auf deren Polen eiserne Anker liegen, behalten nach der Unterbrechung des Stromes einen grossen Theil ihres Magnetismus zurück, selbst dann, wenn die Kerne aus dem weichsten Eisen bestehen. Sobald aber der Anker abgerissen wird, verschwindet der Magnetismus. Ein Luftzwischenraum im magnetischen Kreise sucht stets die Entmagnetisirung zu beschleunigen. Ein magnetischer Kreis, der aus einem langen Luftwege und einem kurzen Eisenwege besteht, entmagnetisirt sich viel rascher als ein Kreis, der aus einem kurzen Luftwege und aus einem langen Eisenwege gebildet wird. In langen Eisenstücken sucht die wechselseitige Wirkung der verschiedenen Theile den Magnetismus, den sie besitzen, festzuhalten; sie werden deshalb weniger rasch entmagnetisirt. In kurzen Eisenstücken, in denen die wechselseitigen Wirkungen schwach oder überhaupt kaum vorhanden sind, ist die Magnetisirung weniger beständig und verschwindet fast augenblicklich beim Aufhören der magnetisirenden Kraft. Kurze Stückchen und kleine Kugeln von Eisen besitzen keinen „magnetischen Rückstand". Daher rührt die Annahme, dass schnell arbeitende Elektromagnete kurze Kerne besitzen müssen. Wie erwähnt haben, ist die Anwendung langer Kerne darin begründet, dass die gewünschte Länge für die Wickelung des Drahtes erreicht wird, der zur Fortleitung desjenigen Stromes erforderlich ist, welcher den Magnetismus durch die Luftzwischenräume treibt. Soll für den Zweck schneller Wirkung die Länge geopfert werden, so muss die Wickelung auf dem kurzen Kerne mehr angehäuft werden. Die Elektromagnete amerikanischer Telegraphenapparate besitzen gewöhnlich kürzere Kerne und eine verhältnissmässig

Digitized by Google

grössere Dicke der Umwickelung als die Apparate der europäischen Verwaltungen.

Schnell wirkende Elektromagnete für Chronographen.

Obgleich die für Telegraphenapparate bestimmten Elektromagnete, und besonders Relaismagnete schnell wirken müssen, so ist doch für die zur Bewegung der Schreibfedern in Chronographen nothwendigen Elektromagnete noch schnelleres Arbeiten Bedingung. Werden Chronographen z. B. zur Messung der Geschwindigkeit von Geschossen oder der einer Tonwelle in der Luft benutzt, so besteht die gewöhnliche Art der Anfzeichnung darin, dass ein elektrischer Strom selbstthätig durch die zu beobachtende Bewegung unterbrochen wird, wobei der Anker eines im Stromkreise befindlichen Elektromagnetes zur Auslösung gelangt. Eine Feder oder eine andere Vorrichtung zieht den Anker ab und veranlasst eine an ihm befestigte Schreibfeder oder einen Schreibstift zur Aufzeichnung einer Marke auf einer sich bewegenden Fläche, in der Regel auf einem Stück Papier, das über eine sich gleichmässig umdrehende Trommel gewickelt ist. Zwischen dem Vorgang der Stromunterbrechung und der Vollendung der Aufzeichnung durch den Schreibstift sind verschiedene Ursachen der Verzögerung wirksam. Zunächst besitzt der Elektromagnet und der Stromkreis, in dem ersterer eingeschaltet ist, eine bestimmte Zeitconstante, so dass der Strom Zeit zum Abfallen braucht. Ferner kann der Magnetismus dem Strome gegenüber verzögert werden, wenn der Kern oder die Spulen so angeordnet sind, dass Wirbelströme entstehen, oder wenn die eisernen Theile einen nahezu geschlossenen magnetischen Kreis bilden. Endlich kann die Trägheit der sich bewegenden Theile beträchtlich sein, wodurch die Bewegung sogar sich verzögert, nachdem schon der Magnetismus verschwunden ist. Der ganze Zeitverlust zwischen der Stromunterbrechung und der Bildung des Zeichens wird als „Latenz“ des Apparates bezeichnet. F. J. Smith aus Oxford, von dem diese Bezeichnung stammt, hat mit Erfolg Schreibvorrichtuugen hergestellt, die eine Latenz von weniger als 0,0003 einer Sekunde besitzen.

Um die Zeitconstante des Stromkreises zu verringern, muss man den Elektromagnet klein herstellen und mit möglichst geringer Kupfermenge versehen. Der Kupferdraht soll hauptsächlich an den Polenden der Kerne, ähnlich wie bei dem Magnet von Hughes angebracht werden. Auch ein beträchtlicher inductionsloser Wider-

Digitized by Google

stand muss im Stromkreise vorhanden sein. Das Eisen ist fein zu blättern und im Joche zu trennen. Die sich bewegenden Theile müssen möglichst leicht und gedrängt sein und die Federn solche Form besitzen, dass sie schnell wirken.

Die Herstellund derartiger Elektromagnete ist von Hipp[1]), Schneebeli[2]), Marcel Deprez[3]), Mercadier[4]), F. J. Smith[5]) und anderen betrieben worden. Es wird genügen, zwei der besten Formen von M. Deprez und eine von Smith für sein Laboratorium in Oxford hergestellte zu beschreiben.

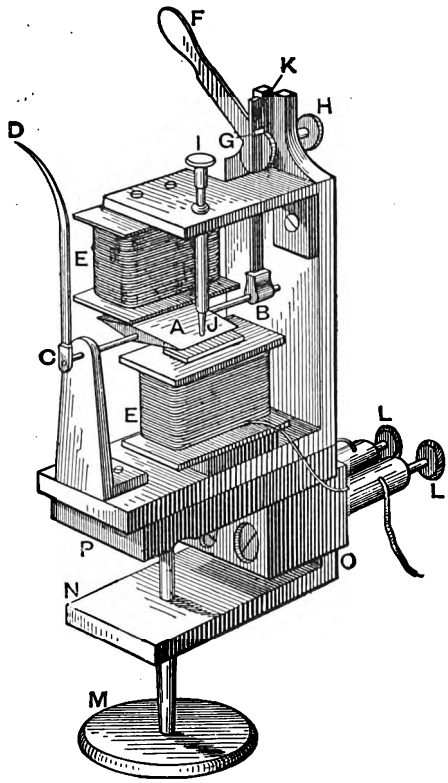


Fig. 98.

Figur 98 zeigt in natürlicher Grösse eine der von Deprez benutzten Formen. Zwei Elektromagnete *E, E*, werden von je einem geraden Kern aus dünnen Blechstreifen gebildet. Der Anker ist rautenförmig und drehbar gelagert. Er wird in seiner Bewegung durch den Anschlagstift *IJ* begrenzt und durch die Feder *BK* beeinflusst, die wieder von einem Hebel *F* regulirt wird. *CD* ist der Schreibstift. Mittels einer Klemmschraube *M* kann der Apparat an einer Unterlage festgeschraubt werden. Wird die Bewegung des Ankers auf 2 *mm* begrenzt, so lässt sich die Latenz auf 0,00016 Sekunden beim Öffnen des Stromkreises oder auf 0,00048 Sekunden beim Schliessen des Stromkreises vermindern.

1) Mittheilungen der naturforschenden Gesellschaft in Bern, 1853. S. 113; und 1885. S. 190.

2) Bulletin de le Société dss Sciences naturelles de Neuchâtel, Juni 1874 und Februar 1876.

3) La Lumière Electrique, IV, S. 282. 1881

4) Ebendaselbst IV, S. 404. 1881.

5) Phil. Mag., Mai 1890, S. 377; und August 1890.

Digitized by Google

Die zweite von Deprez benutzte Form bildet einen polarisirten Apparat, der einen kräftigen Dauermagnet (Figur 99) enthält. Die Schenkel stehen aufwärts und sind oben mit zwei verstellbaren Polstücken *B D* versehen. Zwischen den Schenkeln befindet sich eine flache Spule *E* mit einem Kern aus fein zertheiltem Eisen. Über dem Kern und von ihm magnetisirt sitzt ein kleiner Anker aus weichem Eisen von dreieckigem Querschnitt, der auf einer Schneide am Ende des Kernes drehbar gelagert ist und von einer Feder *F* beeinflusst wird. Der Apparat ist dem Elektromagnet von Hughes ähnlich; der Anker steht mit einem der beiden Polstücke in Berührung, die Feder ist so eingestellt, dass ihre Kraft zum Abreissen des Ankers beinahe ausreicht. Fliesst der Strom um den in der Mitte befindlichen Kern in passender Richtung, so wird der Anker abgerissen.

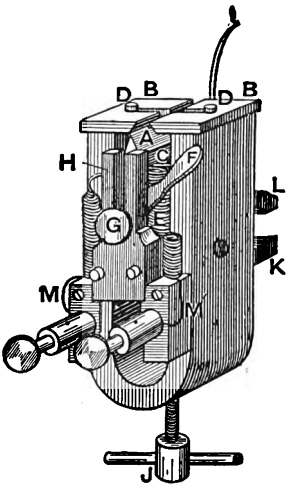


Fig. 99.

Ein elektrischer Strom, der durch Schliessung des Stromkreises auf die Dauer von nur $\frac{1}{40\,000}$ Sekunde hervorgerufen wird, genügt, den Apparat in Thätigkeit zu setzen; nach Deprez braucht man aber ungefähr 0,001 Sekunde zum Abreissen des Ankers.

Die Form des von Smith benutzten Elektromagnetes ist in Figur 100 in natürlicher Grösse abgebildet. Das Joch besteht aus einem kleinen rechteckigen Block von 18 Millimeter Länge und 22 Quadratmillimeter Querschnitt. Die Kerne bilden dünne Cylinder von 1,5 Millimeter Durchmesser und 9,5 Millimeter Länge. Sie sind bei einer niedrigen Temperatur gut ausgeglüht und später mit dem Hammer oder der Feile nicht mehr berührt worden. Der Anker *A* ist eine dreieckige Röhre aus sehr dünnem Eisen, an der der Hebel *L* aus Aluminium befestigt ist. Die Berührungs-

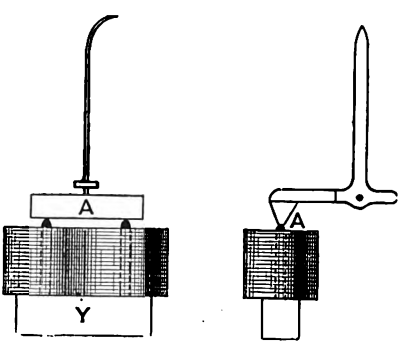


Fig. 100.

Digitized by Google

fläche des Ankers ist abgerundet, und die Enden der Kerne sind halbkugelförmig gestaltet. Nachdem die Kerne in das Joch eingepasst worden sind, wird das Ganze in einem Gasofen ausgeglüht. Die beiden Elektromagnetspulen werden nebeneinander geschaltet. Smith findet, dass bei der nämlichen Zahl erregender Ampère-Windungen die Länge der Kerne die Latenz sehr stark beeinflusst. Letztere beträgt 0,0003 Sekunden.

Ansteigen und Abnahme des Magnetismus.

Wird die erregende Batterie geschlossen, so ist Zeit erforderlich, dass der Strom zu seiner vollen Stärke anwächst. In Folge dessen gebraucht auch der Magnetismus Zeit, um anzusteigen: zuerst geschieht dies allmählig, nachher schneller, dann wieder langsamer, wenn er sich dem höchsten Werthe nähert. Ein Elektromagnet, besonders wenn er massiv ist und eine solche Form besitzt, dass nahezu ein geschlossener Kreis gebildet wird, gebraucht auch Zeit, um seinen Magnetismus nach dem Aufhören des Stromes zu verlieren. Wird der Stromkreis eines grossen Elektromagnetes plötzlich unterbrochen, so entsteht ein langer dünner Funken an der Trennungsstelle des Stromkreises. Die Dauer des Funkens kann merkliche Zeit betragen. In verschiedenen Fällen setzt der Magnet nach der Trennung des Stromkreises und dem Aufhören des Funkens die Abgabe des Magnetismus fort; die inductive Wirkung des letzteren kann die umgebende Drahtspirale laden, so dass sie Funken aussenden und den sie berührenden Personen elektrische Schläge ertheilen kann.

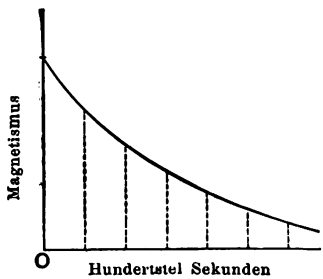


Fig. 101.

Das Verhältniss, in dem ein Elektromagnet seinen Magnetismus abgiebt, ist nicht gleichmässig. Die Curven des verschwindenden Magnetismus zeigen ungefähr die in Figur 101 angegebene Gestalt; der Betrag des Abfalls ist anfangs am grössten. Massive Elektromagnete, wie sie in Dynamomaschinen benutzt werden, können einige Minuten zur Abgabe ihres Magnetismus gebrauchen.

Digitized by Google

Kapitel VIII.

Wickelung zum Eintauchen des Kernes.

Den Apparat, in dem ein Eisenkern in eine röhrenförmige Elektromagnetspule — Solenoid — hineingezogen wird, nenne ich Wickelung zum Eintauchen. Schon früher war bekannt, dass ein Stück Eisen in eine Spule hineingezogen werden kann. Die Wirkung ist der eines in einen Cylinder eintretenden Kolbens ähnlich; sie gleicht diesem Vorgange im Hinblick auf den ausgedehnten Bewegungsbereich.

Ein einfacher Versuch dient zur Klarlegung. Eine röhrenförmige Drahtwickelung oder ein Solenoid *A* mit Gestell befindet sich auf einem Tisch. Die Enden der Wickelung sind mit einer passenden Batterie *B* verbunden. Mittels eines Stromschlüssels *S* kann der Stromkreis geschlossen und unterbrochen werden. Der Eisenkern *C* lässt sich in die Öffnung der Spule einführen. Führt man ein Ende des Kernes in die Öffnung der Spule ein und schliesst den Strom mittels des Schlüssels, so wird der Kern in die Spule hineingezogen, seine Enden ragen nach dem Aufhören der Bewegung gleichweit aus der Spule hervor, wie dies in der Figur 102 dargestellt ist. In dieser Lage herrscht stabiles Gleichgewicht. Sucht man den Kern gewaltsam zu entfernen, lässt ihn aber dann los, so wird er augenblicklich in die frühere Lage in Folge der Anziehung zurückgebracht. Bei diesem Versuche fühlt es sich so an, als ob während des Herausziehens eine im Inneren befindliche Feder Widerstand leistete. Wegen dieser Wirkung wird der Magnet zuweilen „Saugender Elektromagnet“ genannt.

Die Verwendung einer derartigen Vorrichtung wurde im Jahre 1846 unter dem Namen eines „neuen Elektromagnetes“ patentirt. Elektromagnetische Maschinen oder Triebmaschinen wurden unter Benutzung dieses Apparates von Page, sowie später auch von anderen hergestellt und allgemein als eine ausgezeichnete Erfindung bekannt. Suchen wir aber in der Litteratur Auskunft über die Eigenschaften der Spule mit Kern zum Eintauchen, so

Digitized by Google

erhalten wir fast gar keinen Aufschluss. Gewöhnlich wird die Sache in allgemeinen Ausdrücken behandelt, indem man sagt: Es ist eine Art saugender Magnet vorhanden; der Kern wird in die Wickelung hineingezogen". Zuweilen liest man, das die Anziehung am grössten ist, wenn der Kern sich ungefähr halb in der Spule befindet. Diese Angabe trifft in einem besonderen Falle zu, ist aber in vielen anderen Fällen unrichtig. In einem anderen Werke wird gesagt, dass die Anziehung im Abstande von einem Centimeter unterhalb der Mitte der Wickelung für Kerne jeder beliebigen Länge am grössten sei. Dies ist vollständig unrichtig. Nach anderer Angabe soll eine weite Spule weniger stark anziehen, als eine enge; diese Behauptung ist in manchen Fällen richtig

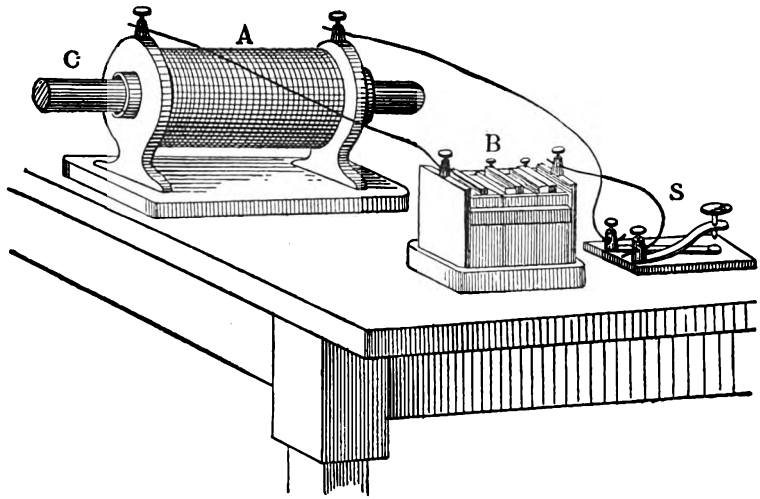


Fig. 102.

und in anderen unrichtig. Der Grund, weshalb der Gegenstand viel sorgfältigerer Betrachtung bedarf, liegt darin, dass wir in dem Mechanismus der Spule mit Kernen zum Eintauchen Mittel besitzen, nicht allein die elektromagnetische Anziehung gleichartig zu gestalten, sondern auch deren Wirkungsbereich sehr auszudehnen. Wir wollen den Wirkungsbereich des gewöhnlichen Elektromagnetes mit dem Wirkungsbereich der Spule mit Kern zum Eintauchen in einfacher Weise vergleichen.

Die Figur 103 stellt eine röhrenförmige Wickelung von 23 Centimeter Länge dar. An dem eisernen Kern von gleicher Länge sitzt eine Öse, mittels deren er an dem Haken einer gewöhnlichen Federwage aufgehängt wird. Mittels dieser Vor-

Digitized by Google

richtung lässt sich der in verschiedenen Lagen von der Spule auf den Eisenkern ausgeübte Zug messen. Wird der Kern zuerst in beträchtlicher Höhe über der Spule gehalten und allmählich gesenkt, so beginnt der Zug bemerkbar zu werden, wenn das untere Ende des Kernes sich noch in geringer Entfernung von der Öffnung der Spule befindet, der Zug wächst, sobald der Kern in die Spule eintritt. Im vorliegenden besonderen Fall, in dem der Kern gleiche Länge wie die Spule besitzt, wächst der Zug sobald der Anker weiter eintaucht, und wird ein Maximum, wenn der Kern ein wenig mehr über die Hälfte eintaucht. Von diesem Punkt an wird der Zug geringer bis dahin, wo die Enden des Eintauchkernes mit den Enden der Spule zusammenfallen; hier hört der Zug auf. Die Anziehung, die ungleich vertheilt ist, erstreckt sich nun über einen Bereich, der etwas grösser als die Länge des Cylinders ist. Über den Wirkungsbereich hat Robert Hunt im Jahre 1856 einige Angaben geliefert. Er besprach die verschiedensten Formen von Triebmaschinen und ihren Wirkungsbereich. Ein Hufeisenelektromagnet wirkte bei der Berührung mit einer Zugkraft von 100 *kg*. Wurde der Abstand auf 0,025 *mm* bemessen, so fiel die Zugkraft auf 41 *kg* und bei Vergrösserung des Abstandes auf 0,5 *mm* fiel die Zugkraft auf 16 *kg*. Der Unterschied zwischen 100 und 16 *kg* entstand innerhalb eines Bereiches von 0,5 *mm*. Diesem Ergebnisse stellte er die Wirkung eines andern Mechanismus gegenüber. Derselbe bestand nicht aus einer einfachen Spule mit Kern zum Eintauchen, sondern bildete eine besondere Art eines Elektromagnetes, die 1845 von Hjörth in Liverpool hergestellt worden war. Einen hohlen abgestumpften Kegel von Eisen (Figur 104) mit Drahtumwickelung — hohlen Elektromagnet — liess man auf einen anderen Elektromagnet wirken, so dass der eine in den anderen tauchen konnte. Wie gross die Anziehung war, wenn zwischen beiden kein Ab-

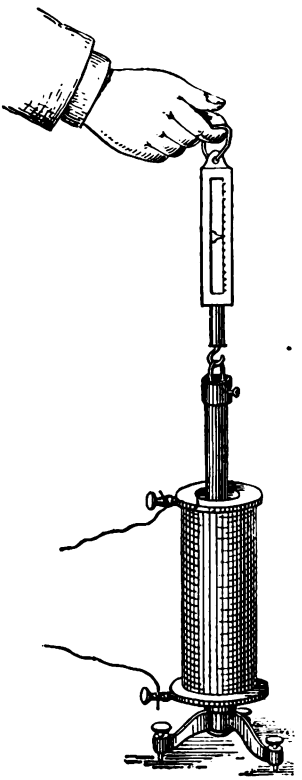


Fig. 103.

Digitized by Google

stand herrschte, darüber befinden sich keine Angaben; in einem Abstand von 25 *mm* betrug die Anziehung (bei dem viel grösseren Apparate als demjenigen von Hunt) $72^1/_2$ *kg*; bei 76 *mm* Abstand 40 *kg*, bei 127 *mm* 33 *kg*. Es war demnach ein Wirkungsbereich von über 127 *mm* vorhanden, wobei die Zugkraft nicht von 100 auf 16 *kg*, wie bei dem Versuch von Hunt, sondern von $72^1/_2$ *kg* auf 33 *kg* fiel. Der Wirkungsbereich besass also gleichmässigere Beschaffenheit. In der Institution of Civil Engineers erörterten Joule, Cowper, Sir William Thomson, Justice Grove und Tyndall diesen Gegenstand vom Gesichtspunkte des Wirkungsbereiches und vom Gesichtspunkte der Thatsache aus, dass es bis jetzt keine Mittel zum Betriebe der bezeichneten Elektromagnete gäbe, als den Aufwand von Zink in einer Primärbatterie. Alle kamen zu dem Schlusse, dass elektrische Triebmaschinen sich nie verlohnen würden. Robert Stephenson fasste die Erörterung am Ende in folgende Worte zusammen: „Es könne kein Zweifel darüber herrschen, dass die Anwendung der durch eine galvanische Batterie erzeugten elektrischen Energie sich gewerblich nicht verwerthen lasse. Abgesehen davon, so scheine die mechanische Anwendung fast unüberwindliche Schwierigkeiten zu haben. Die vom Elektromagnetismus gelieferte Kraft erstrecke sich, obwohl sie gross sei, über einen so kleinen Raum, dass sie für die Praxis bedeutungslos sei. *Ein kräftiger Magnet könne zum Zwecke der Veranschaulichung mit einer Dampfmaschine verglichen werden, die einen sehr grossen Kolben mit einem sehr geringen Hub besässe; eine solche Anordnung sei aber durchaus unerwünscht*“.

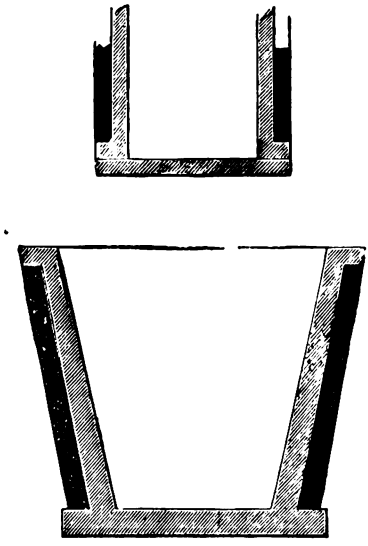


Fig. 104.

Von der Erörterung im Jahre 1856 bis zur Gegenwart sind viele Versuche angestellt worden, um die Bauart eines Elektromagnetes für grossen Wirkungsbereich zu bestimmen. Einen Er-

Digitized by Google

folg hatten aber in der Regel nicht Theoretiker, sondern Männer, die durch die Macht der Umstände zu ihrem Ergebniss gelangten, praktischen Blick besassen und ihren eigenen Weg gingen. Hätten sie versucht, durch Berechnungen mehr Licht in die Sache zu bringen und die Berechnungen etwa auf Angaben hinsichtlich der Oberflächenvertheilung des Magnetismus u. s. w. zu stützen, so würde ihnen dies wahrscheinlich nicht viel geholfen haben. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate würde jedenfalls die Hauptsache umgekehrt haben, denn sie würden belehrt worden sein, dass man keinen Magnet herstellen könne, der innerhalb eines Bereiches gleichmässig Zug ausübe, weil die Zugkraft umgekehrt wie das Quadrat des Abstandes sich ändere. Es kann aber weder die Spule noch der Kern zum Eintauchen wie ein Punkt angesehen werden, demnach ist das Gesetz der umgekehrten Quadrate nicht anwendbar.

Um das Gesetz für die Wickelung mit dem Kern zum Eintauchen kennen zu lernen, setzen wir den einfachen Fall voraus, dass eine Spirale, die nur aus einer Umwindung besteht, auf einen einzigen Punkt als Pol wirkt. Demnächst lässt sich die Wirkung einer langen röhrenförmigen Spule auf einen Punktpol betrachten. Endlich gelangt man zu dem Fall, in dem eine röhrenförmige Spule auf einen langen Kern wirkt, und zuletzt zu dem Fall, in dem anstatt des sehr langen Eisenkernes ein kurzer Kern verwendet wird.

Die Wirkung einer langen Röhrenwickelung auf einen eisernen Kern kennt man. Fliesst ein genügend starker Strom durch die Umwindungen und hält man vor die Öffnung der Röhre einen Stab aus weichem Eisen, so wird er in die Spule gezogen. Zieht man den Stab ein wenig heraus, so wird er schnell, wie von einer Feder gezogen, wieder eintreten. Der Zug ist sehr gering, wenn der Stab sich ausserhalb der Wickelung befindet, wird aber stark, sobald der Stab mit seinem Ende in die Wickelung gelangt und hört auf, wenn die Enden gleichweit aus der Wickelung hervorragen. Nimmt man eine kürzere Spirale, etwa eine so kurze, dass die Länge parallel zur Achse sehr klein im Verhältniss zur inneren Öffnung ist, was zutrifft, wenn nur eine einzige Umwindung vorhanden ist, so frägt sich, in welcher Weise der Strom auf einen in der Achse befindlichen Mganet wirkt.

Digitized by Google

Berechnung der Wirkung der Spule auf den Kern zum Eintauchen.

Zunächst setzen wir einen so langen Dauermagnet aus Stahl voraus, dass die schwache Wirkung auf den entfernten Pol vernachlässigt werden kann; es soll also nur ein Pol, etwa der Nordpol der Spule nahe sein. Die Anziehung ändert sich weder im umgekehrten Verhältniss des Quadrates des Abstandes, noch wie eine Kraft, die nach dem Abstande der Achse entlang gemessen wird, sondern umgekehrt wie die dritte Potenz des seitlichen Abstandes. Der Punkt O in Figur 105 bilde den Mittelpunkt des Drahtringes, dessen Radius y ist. $O\ P$ ist die Achse des Ringes, der Abstand zwischen O und P sei x, der seitliche Abstand von P bis zum Ringe sei a. Dann ändert sich die Anziehung in der Richtung der Achse nach dem Mittelpunkte der kreisförmigen Umwindung umgekehrt wie die dritte Potenz von a. Zur Darstellung der Änderungen der Anziehung an verschiedenen Punkten der Achse dient die nachstehende Curve; die Figur 106 zeigt einen Schnitt oder die Seitenansicht der Umwindung. In verschiedenen Abständen, rechts und links von der Umwindung, sind senkrecht die entsprechenden Kräfte aufgetragen. Die Berechnung bezieht sich auf die Wirkung eines Stromes von 10 Ampère Stärke, der durch den Ring von 1 *cm* Radius fliesst. Die Kraft, mit der ein Strom von solcher Stärke auf einen im Mittelpunkt ange-

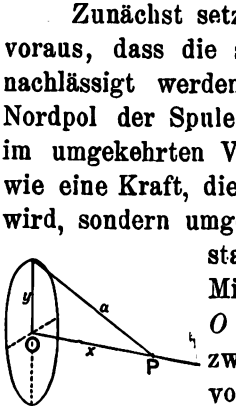


Fig. 105.

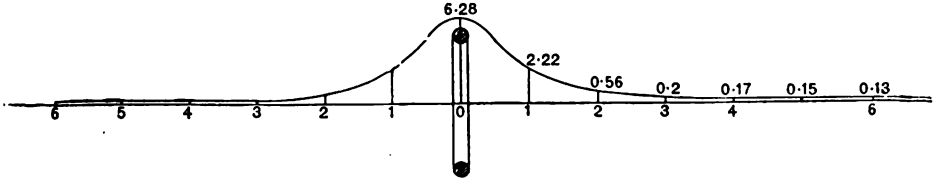


Fig. 106.

brachten Pol von der Einheit der Stärke wirkt, beträgt 6,28 Dynen. Wird der Pol der Achse entlang fortbewegt, so vermindert sich die Anziehung. In einem Abstande der einfachen Länge des Radius sinkt die Anziehungskraft auf 2,22 Dynen. In einem Abstande gleich dem doppelten Radius oder in dem des Durchmessers beträgt sie nur 0,56 Dynen, also weniger als den zehnten Theil der Kraft, die im Mittelpunkte O wirkte. Im Abstande gleich dem doppelten Durchmesser ist sie auf 0,17 Dynen gesunken,

Digitized by Google

und im Abstande gleich dem dreifachen Durchmesser beträgt sie ungefähr 2 Prozent der Anziehung, die im Mittelpunkte herrschte.

Nehmen wir also einen sehr langen Magnet, so lässt sich die Wirkung auf den entfernten Pol gänzlich vernachlässigen. Hätte man etwa einen langen Stahlmagnet, dessen Südpol einen Abstand von $1^1/_2$ bis 2 Meter vom Nordpol besitzt und befände sich der Nordpol in einem Punkte, der um den dreifachen Durchmesser (6 *cm*, da der Radius der Windung 1 *cm* beträgt) von der Mündung der kreisförmigen Umwindung absteht, so würde die Anziehung des Stromes in einer Spirale auch auf den um 3 Durchmesser entfernten Nordpol praktisch vernachlässigt werden können; da sie weniger als 2 Prozent der Anziehung betrüge, die entsteht, wenn der Pol richtig in die Windung hineingeschoben wird. Bei einer röhrenförmigen Spule, die zum Mindesten aus einer ganzen Lage Drahtwindungen besteht, muss die Wirkung aller Umwindungen in Rechnung gezogen werden. Befindet sich die nächste Draht-

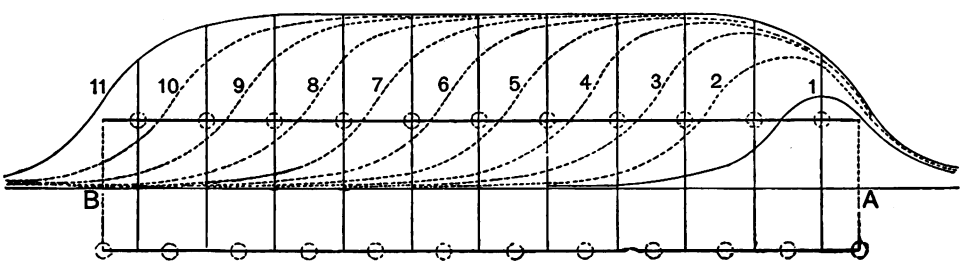


Fig. 107.

umwindung in einem Abstande des dreifachen Durchmessers, so besitzen alle anderen Umwindungen einen grösseren Abstand. Wenn wir nun eine so kleine Grösse wie 2 Prozent des ganzen Betrages vernachlässigen dürfen, so können wir auch die Wirkung der entfernteren Windungen vernachlässigen. Zur Darstellung der Wirkung einer röhrenförmigen Spule kann eine von Sayers erdachte graphische Methode benutzt werden. Nehmen wir eine mit Kupferdraht von einem zum andern Ende bewickelte Röhre an, so würde deren Wirkung praktisch dieselbe sein, als ob der Kupferdraht aus einer Anzahl von Umwindungen, die in geringen Abständen liegen, zusammengesetzt wäre. Beträgt z. B. die Anzahl der Umwindungen für ein Centimeter Länge der röhrenförmigen Spule vier, und hätte man anstatt dieser vier Drähte einen starken Draht in der Mitte, der vierfachen Strom leitet, so würde die Wirkung die nämliche bleiben. Das Diagramm (Figur 107) ist

Digitized by Google

unter der Voraussetzung berechnet, dass die Wirkung nicht sehr abweicht, wenn die Drähte in der vorangegebenen Weise in wenige vereinigt werden; die Berechnung ist dann leichter. Beginnt man an dem mit *A* bezeichneten Ende der Röhre und mit den Drähten über dem ersten Centimeter Länge, vereinigt sie, so lässt sich die mit *1* bezeichnete Curve für die Wirkung der ersten Abtheilung zeichnen. Für die nächste Abtheilung ergibt sich eine ähnliche Curve; fügt man aber die Höhen der zweiten Curve jenen der ersten hinzu, so ergibt sich die mit *2* bezeichnete Curve. Für die dritte Abtheilung erhält man nach Hinzufügung der Ordinaten der vorigen Curve eine dritte Curve *3*. In dieser Weise ergibt sich allmälig die Endkurve für die gesammte Wirkung der Röhrenspule auf einen Pol an verschiedenen Punkten der Längsachse. Die resultirende Curve beginnt etwa in einer Entfernung von $2^1/_2$ Durchmesser von dem Ende, steigt sanft, dann plötzlich an, biegt um und wird beinahe gerade. Sie steigt in einem Abstande von ungefähr $2^1/_2$ Spulendurchmesser von *A* nicht mehr an; die Curve wird an diesem Punkte praktisch gerade und ändert sich nicht mehr als 1 Prozent, wie lang auch die Röhre sein mag. In einer röhrenförmigen Spule von 2,5 *cm* Durchmesser und 50 *cm* Länge wird z. B. ein gleichmässiges magnetisches Feld ungefähr 38 *cm* entlang der Mitte der Spule vorhanden sein. Das bedeutet, dass der Werth der magnetischen Kraft entlang der Spulenachse ausserhalb der Mündung der Röhre beginnt, dann wächst, und zu einem gewissen Höchstwerth ansteigt, der etwas hinter der Mündung der Röhre liegt, danach auf der ganzen Rohrlänge gleich bleibt und dann symmetrisch zum anderen Ende abfällt. Die zur Curve gezogenen Ordinaten stellen die Kräfte an den entsprechenden Punkten der Röhrenachsen dar. Man kann annehmen, dass sie nicht einfach die magnetisirende Kraft darstellen, sondern die Anziehung auf einen Pol am Ende eines unbestimmt langen, dünnen Stahlmagnetes von bestimmter Stärke.

Die Regel zur Berechnung der magnetischen Kraft in irgend einem Punkt der Achse einer langen röhrenförmigen Spule, innerhalb des Bereiches, in dem die Kraft gleichmässig wirkt, ist:

$H = \frac{4}{10}\,\pi$ mal den Ampère-Windungen auf das Centimeter Länge. Da die gesammte magnetisirende Kraft einer röhrenförmigen Spule nicht nur proportional der Stärke der magnetischen Kraft an irgend einem Punkte, sondern auch proportional der Länge ist,

Digitized by Google

so lässt sich die gesammte magnetisirende Wirkung auf ein in die Spule eingeführtes Stück Eisen praktisch durch $\frac{4}{10}\pi$ mal der gesammten Anzahl Ampère-Windungen in dem Theil der röhrenförmigen Spule ausdrücken, der das Eisen umgiebt. Ragt das Eisen auf eine Länge von drei Durchmessern an beiden Enden vor, so beträgt die gesammte magnetisirende Kraft $\frac{4}{10}\pi$ mal der gesammten Anzahl Ampère-Windungen.

In der Regel kommt aber dieser Fall nicht allein in Frage. Stahlmagnete mit unveränderlichen Polen bestimmter Stärke lassen sich nicht herstellen. Selbst der härteste Stahlmagnet, der so magnetisirt ist, um einen Dauerpol, nahe oder an dem Ende des Stabes zu liefern, — ganz dicht am Ende, wenn man ihn in eine magnetisirende Spule bringt — wird hierdurch magnetisirt. Der Pol wird verstärkt, wenn er in die Spule gezogen wird. Gewöhnlich arbeitet man auch nicht mit Stahl, man nimmt Kerne zum Eintauchen aus weichem Eisen, die überhaupt nicht in der Entfernung magnetisirt werden, die aber in dem Augenblick magnetisirt werden, in dem sie in die Mündung der Spule gel ngen und um so mehr magnetisirt werden, je weiter sie hineingelangen. Sie besitzen das Bestreben, erst dann zur Ruhe zu kommen, wenn die Enden gleichweit aus der Spule vorragen. In dieser Lage vervollständigen sie am meisten den magnetischen Kreis und werden am vollständigsten und in stärkstem Grade magnetisirt. Es ist mit der Thatsache zu rechnen, dass, wie auch die magnetisirenden Kräfte längs einer Röhrenwickelung sein mögen, der Magnetismus des eintretenden Kernes wachsen wird, so lange der Kern sich weiter in die Spule bewegt. Es soll nun eine Curve gezeichnet werden, aus der nicht die magnetisirenden Kräfte der Spirale an verschiedenen Punkten, sondern das Product der magnetisirenden Kräfte mit dem anwachsenden Magnetismus des sich vorwärtsbewegenden Kernes ersichtlich ist. Die Curve mit dem flachen Rücken entspricht dem idealen Falle, in dem ein Pol von gleichbleibender Stärke verwendet würde. Die Curve soll aber den praktischen Vorgang für einen eisernen Kern darstellen. Voraussetzung ist, dass ein so langer Kern benutzt wird, dessen Ende noch weit von der Spule entfernt ist, wenn der eine Pol sich in der Spule befindet. Beim Eisenkern hängt es vom Querschnitt und der Güte des Eisens ab, wie viel Magnetismus

Digitized by Google

bei einem gegebenen Betrag magnetisirender Kraft erzeugt wird. Ist der Kern bis zu einem gewissen Punkte in die Spule eingetreten, so kennt man die magnetisirende Kraft, die bis zu diesem Punkte auf den Kern wirkt; er erlangt einen gewissen Betrag an Magnetismus, so dass die Anziehung wächst, obschon die Stärke der magnetischen Kraft von Punkt zu Punkt längs der Spulenachse bis auf einen Abstand von ungefähr zwei Durchmessern vom fernen Ende die nämliche bleibt. Obwohl die magnetische Kraft innerhalb der langen Spirale die nämliche bleibt, so nimmt, weil der Magnetismus des Kernes (so lange dieser nicht gesättigt ist) im Ansteigen sich befindet, die Anziehung in einem beinahe gleichmässigen Masse zu, bis das Eisenstück nahe zum entfernten Ende der Spule sich bewegt hat. Die Figur 108 stellt eine röhrenförmige Spule *B A*, dar. Ein langer Eisenkern befinde sich rechts in der Richtung der Achse, sein Ende werde allmählich an *B* herangebracht. Wenn das Ende bis zu *X* gelangt, wird die Anziehung merklich, wächst rasch, sobald der Kern in die Mündung der Röhre eintritt, dann langsamer, wenn der Kern weiter sich bewegt und erlangt ungefähr am fernen Ende *A* der Röhre ein Maximum *C*. Nähert sich der Kern dem Ende *A*, so gelangt er in den Bereich, in dem die magnetisirende Kraft abnimmt, der Magnetismus befindet sich aber noch im Wachsen, weil zu der gesammten magnetisirenden Kraft immer noch etwas hinzugefügt wird. Diese beiden Wirkungen gleichen sich nahezu aus, so dass die Anziehung zu einem Maximum wird. Dies bezeichnet der höchste Punkt *C* der Curve; die grösste Anziehung herrscht gerade, wenn das Ende des Kernes an der Grundfläche oder dem fernen Ende der röhrenförmigen Spule anlangt. Von diesem Punkte ab sinkt die Anziehung sehr schnell. Die Geschwindigkeit des Abfallens hängt lediglich von der Länge des Kernes ab. Ist der Kern sehr lang, so dass das andere Ende noch sehr weit entfernt ist, so erfolgt ein langsames, über eine Entfernung von drei Durchmessern sich erstreckendes Abfallen

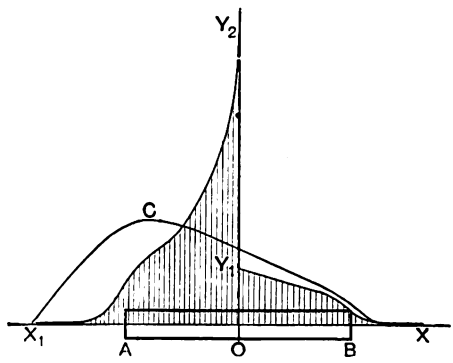


Fig. 108.

Digitized by Google

und ein allmähliches Verschwinden. Kommt indessen der andere Pol in messbaren Abstand von B, so wird die Curve rascher zu einem bestimmten Punkt X_1 fallen. Ist z. B. der Eisenkern doppelt so lang wie die Spule, so wird die Curve beinahe in einer geraden Linie zu einem so gelegenen Punkte abfallen, dass die Enden des Eisenstabes gleichweit aus den Enden der Röhre hervorragen.

Die ähnliche Wirkung wird in allen anderen Fällen eintreten, in denen der Kern zum Eintauchen beträchtlich länger (wenigstens doppelt so lang) als die umgebende Spule ist. Nimmt man einen Kern zum Eintauchen von gleicher Länge wie die Spule, so sind die Wirkungen zuerst fast gleich; sobald aber der Kern ungefähr zur Hälfte, oder etwas mehr als zur Hälfte seiner Länge in die Spule eingetreten ist, so beginnt die Wirkung des anderen aussen befindlichen Poles, der den Kern zurückzuziehen strebt. Obgleich die magnetisirende Kraft weiter wächst, je weiter der Kern eintritt, so erlangt die durch die Spule auf den andern Pol ausgeübte rückwirkende Kraft ein um so stärkeres Wachsthum je mehr sich der Pol der Mündung nähert. In diesem Falle wird das Maximum an einem Punkte eintreten, der etwas weiter liegt, als die Hälfte der Spulenlänge beträgt. Von diesem Punkte an wird die Curve abfallen und bei A auf Null kommen; das heisst es wird keine Anziehung vorhanden sein, wenn beide Enden des Kernes mit den beiden Enden der Spule zusammenfallen. Nimmt man einen Kern, der etwas kürzer als die Spule ist, so kommt die Anziehung zu einer noch früheren Zeit auf Null. Die grösste Anziehung tritt früher ein und ebenso die Verminderung der Anziehung auf Null. Liegt der Kern vollständig innerhalb des Bereiches der Röhre, innerhalb dessen die Stärke der magnetischen Kraft gleichmässig ist, so wird keine Wirkung auf den kurzen Kern ausgeübt. Das heisst, für irgend einen Theil der Röhre, der dem flachen Rücken der Curve in Figur 107 entspricht, herrscht, wenn der eiserne Eintauchkern so kurz ist, dass er ganz in jenem Bereiche liegt, keine Einwirkung, es wird in keiner Richtung auf ihn ein Zug ausgeübt. Es lässt sich dies auch durch Versuche erweisen. Im College zu Finsbury wird eine Anzahl von röhrenförmigen Spulen zu diesem Zwecke benutzt. Eine Spule ist ungefähr 23 *cm* lang, eine etwa halb, eine andere ein Viertel so lang. Sie sind in der Weise übereinstimmend hergestellt, als sie genau dasselbe Kupfergewicht besitzen, der Draht ist demselben Ringe entnommen. Die lange

Digitized by Google

Spule besitzt aber mehr Windungen als die kurze Spule, weil bei der kurzen jede Umwindung im Durchschnitt eine grössere Drahtmenge erfordert und demnach dasselbe Gewicht an Draht nicht die gleiche Zahl Windungen ergibt. Mittels einer Wage wird der nach abwärts gerichtete Zug auf Kerne verschiedener Länge in verschiedenen Abständen gemessen. In jedem Falle wächst die Anziehung und wird ein Maximum, dann nimmt sie ab. Nimmt man nun einen langen Kern von etwa doppelter Länge der Spule, so wächst die Anziehung, so wie der Kern abwärts sich bewegt, das Maximum der Anziehung tritt ein, wenn das untere Ende zum Boden gelangt. Darüber hinaus wird die Anziehung schwächer. Benutzt man den nämlichen Kern, aber kürzere Spulen, so ergibt sich das Nämliche, aber merklicher. Das Maximum der Anziehung tritt in allen Fällen ein, nicht, wenn der Kern sich zur Hälfte in der Spule befindet, sondern wenn die Grundfläche des Kernes gerade beginnt aus der Grundfläche der verwendeten Spule zu treten. Nimmt man einen kürzeren Kern, so ist das Ergebniss verschieden. Besitzt der Kern dieselbe Länge wie die Spule, so tritt das Maximum der Anziehung ein, wenn der Kern sich ungefähr zur Hälfte in der Spule befindet. Dagegen tritt bei einem sehr kurzem Kern — z. B. bei einem von ungefähr ein sechstel der Spulenlänge — die grösste Anziehung ein, sobald die Mündung der Spule erreicht wird. Sind beide Enden so weit eingetreten, dass der Kern sich im Bereiche des gleichmässigen magnetischen Feldes befindet, so herrscht am einen Ende keine grössere Anziehung als am anderen Ende; das eine Ende strebt sich mit bestimmter Kraft abwärts in die Spule zu bewegen, während das andere Ende sich mit genau derselben Kraft aufwärts zu bewegen sucht; beide Kräfte halten einander das Gleichgewicht. Benutzt man eine kleine Eisenkugel, um die Röhre zu untersuchen, so ergibt sich, dass die einzige Stelle, an der Anziehung auf die Kugel ausgeübt wird, dort liegt, wo die Kugel an der Mündung der Röhre eintritt. Nur ungefähr $1^1/_4$ *cm* in der Spule herrscht noch Anziehung; aber durchaus keine Anziehung weiter im Innern der Röhre, auch ebenso wenig messbare Anziehung ausserhalb.

Diese Wirkungen der Spule auf den Kern lassen sich noch von einem anderen Standpunkt aus betrachten.

Die durch eine Kraft geleistete Arbeit wird durch das Product aus Kraft und Weg, den der bewegte Körper zurück-

Digitized by Google

gelegt hat, gemessen. Im vorliegenden Falle handelt es sich um die längs eines gewissen Weges veränderliche Kraft. Deshalb muss die Kraft in jedem Punkte bestimmt und mit dem kleinen Streckentheilchen multiplicirt werden. Man hat einen Mittelwerth der Kraft für die kleine Strecke anzunehmen. Der folgende Mittelwerth der Kraft wird mit dem nächsten kleinen Streckentheil multiplicirt, und so weiter. In dieser Art wird die längs der ganzen zurückgelegten Strecke geleistete Arbeit bestimmt. Ist die zurückgelegte Strecke X, so ist dx ein unendlich kleines Längenelement, das mit der Kraft f zu multipliciren ist, wodurch man die Arbeit erhält, die bei Zurücklegung des unendlich kleinen Weges geleistet worden ist. Die auf der ganzen zurückgelegten Wegestrecke von den verschiedenen Werthen von f geleistete Arbeit wird durch die Summe der Producte gebildet. Demnach ist, wenn W die Arbeit bezeichnet:

$$w = \int f\,dx$$

Nimmt man eine Spule und hält den Kern entfernt, so ist ungeachtet des Stromes praktisch keine Wirkung merkbar, bringt man den Kern näher, so beginnt die Wirkung, es ist Anziehung vorhanden, die wächst, sobald der Kern eintritt: dann gelangt die Wirkung zum Maximum, und verschwindet, sowie das Ende des Kernes anfängt, aus der anderen Seite auszutreten.

Bei diesem Vorgang wird ein gewisser Gesammtbetrag an Arbeit geleistet. Kennt man die Grösse der Kraft an jedem Punkte längs der zurückgelegten Strecke, so lässt sich die auf dem Wege geleistete Arbeit durch die Fläche einer Kraftkurve ausdrücken. Geht man auf die Curve $X\,C\,X_1$ zurück (Figur 108), so stellen hier die Ordinaten die Kräfte dar. Die Fläche unterhalb der Curve ergibt den Werth der vom System verrichteten Arbeit und stellt ebenso die Arbeit dar, die wir verrichten müssten, um das System wieder zu trennen.

Vergleichen wir Vorstehendes mit dem Fall, in dem wir anstatt der vertheilten Anziehung, eine viel stärkere Anziehung auf einer viel kürzeren Strecke haben. Dieser Vergleich ergibt sich durch die andern Curven in der Figur 108. Der Kern der Spule bestehe aber nicht aus einem Stabe, sondern sei aus zwei Theilen hergestellt, die mittels einer Schraube in der Mitte zusammengesetzt, oder in irgend einer anderen mechanischen Weise mit einander verbunden werden können.

Digitized by Google

Die zwei Theile werden zuerst zusammen geschraubt und in die Spule gelassen. Die geleistete Arbeit ergibt sich aus der Fläche unter der schon erörten Curve. Nunmehr werde der Eisenkern in zwei Kerne zerlegt, ein Ende desselben wird in die Spule gebracht und in ähnlicher Weise wie vorhin hineingezogen. Da der Stab nur kurz ist, so wird der Eintritt des Maximums etwas verschoben. Es möge der Kern nur zur Hälfte in der Spule sich befinden, so ist bis dahin eine gewisse Menge Arbeit durch den Apparat geleistet worden. Da das Eisenstück kürzer ist, so wird die Kraft-Curve die von X zu Y_1 ansteigt, niedriger als die Curve $X\,C\,X_1$ verlaufen. Die Fläche unterhalb der niedrigeren Curve, die in der Hälfte des Weges aufhört, stellt die bei der Anziehung des halben Kernes geleistete Arbeit dar. Jetzt lassen wir in das andere Ende die zweite Hälfte des Stabes eintreten. Es kommt nun nicht nur die Anziehung der Röhre, sondern auch die des darin befindlichen Eisens in Betracht; das Eisen wirkt wie ein Elektromagnet. Die Anziehung beginnt allmählich, steigt dann rasch an und lässt die Kraftcurve zu einer steilen Spitze ansteigen, da die Kraft gross wird, wenn der Abstand der Kerne sehr gering ist.

In diesem Fall erhält man eine abweichende, aus zwei Theilen bestehende Curve; einen Curventheil, der die Wirkung des Eintretens der ersten Hälfte des Kernes angibt, einen steileren Theil für die Wirkung der zweiten Hälfte. Es ergibt sich jedoch, dass die nämliche Menge Eisen genau in derselben Weise durch die nämliche Menge elektrischen Stromes magnetisirt worden ist; der gesammte Betrag der in beiden Fällen geleisteten Arbeit ist gleich. Ob man den ganzen Kern mit einer sanften Anziehung über eine lange Strecke sich bewegen lässt, oder ob man den Kern in zwei Theilen hineinbringt — einen Theil bei sanftem Zuge und den anderen Theil bei plötzlichem Hineinspringen bis zum Ende — die geleistete Arbeit muss dieselbe sein; die gesammte Fläche unterhalb der beiden neuen Curven muss ebenso gross sein wie die unterhalb der ersten Curve. Der Vortheil dieser Methode besteht demnach nicht darin, mehr Arbeit aus der aufgewendeten Energie zu bekommen, sondern darin, dass die Anziehung über einen beträchtlichen Raum vertheilt wird. Die Vertheilung erfolgt jedoch nicht ganz gleichmässig über den ganzen Raum.

Digitized by Google

Bemerkung zur Figur 105.

Die Formel für den Ausdruck der Kraft (in Dynen), die auf die Einheit des Poles in einer Entfernung x von der Stromstärke i Ampère ausgeübt wird, wenn der Stromkreis den Radius y besitzt, lautet:

$$f = 2\pi i y^2 \Big/ (x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}} \, 10$$

oder

$$f = 2\pi i y^2 \Big/ 10\, a^3$$

da $\sqrt{x^2 + y^2} = a$ ist.

Hufeisenförmige Kerne zum Eintauchen.

Im Jahre 1846 zeigte Guillemin die Benutzung eines doppelten Kernes zum Eintauchen, der aus einem hufeisenförmig gestalteten Kerne bestand, dessen beide Schenkel in zwei röhrenförmige Spulen hineingezogen wurden. Vorrichtungen dieser Art finden sich in verschiedenen Bogenlampen vor.

Versuchsangaben über Spulen mit Kern zum Eintauchen.

Von Zeit zu Zeit sind Untersuchungen zur Erläuterung der Wirkung der Spule mit Kern zum Eintauchen angestellt worden. Hankel prüfte im Jahre 1850 die Beziehung zwischen der Anziehung auf einen gegebenen Theil des Kernes und der erregenden Kraft. Wenn der Eisenkern so dick, und die magnetisirende Kraft so gering war, dass die Magnetisirung des Eisens sich nie der Sättigung näherte, so fand er, dass die Anziehung dem Quadrate der Stromstärke und dem Quadrate der Anzahl Drahtumwindungen proportional war. Hieraus folgt die Regel — die nur für einen ungesättigten Kern in einer gegebenen Lage zutrifft — dass die Anziehung proportional dem Quadrate der Ampère-Windungen ist.

Man konnte dies erwarten, denn der Magnetismus des Eisenkernes wird unter den oben gemachten Voraussetzungen den Ampère-Windungen proportional sein, und, da die Stärke des magnetischen Feldes, in dem der Eisenkern sich befindet, ebenfalls den Ampère-Windungen proportional ist, so muss die Anziehung, die gleich dem Produkt des Magnetismus und der Stärke des magnetischen Feldes ist, dem Quadrate der Ampère-Windungen proportional sein.

Digitized by Google

Dub, der Kerne von verschiedener Dicke prüfte, fand, dass die Anziehung sich wie die Quadratwurzel des Kerndurchmessers ändere. Seine eigenen Versuche zeigen, dass dies ungenau ist, und thun dar, dass die Kraft ebenso nahe proportional dem Durchmesser als proportional seiner Quadratwurzel ist. Dies ist gleichfalls begründet. Der magnetische Kreis besteht zum grossen Theil aus Luftwegen, die von den magnetischen Kraftlinien durchflossen werden. Da die Luft den Haupttheil des magnetischen Widerstandes des Kreises bildet, so vermehrt das, was den Luftwiderstand vermindert, die Magnetisirung. In Folge dessen wird auch die Anziehung verstärkt. Nun ist der Widerstand des Luftweges hauptsächlich von der Oberfläche abhängig, die durch die Endtheile des Eisenkernes gebildet werden. Eine Vergrösserung der Oberfläche vermindert den magnetischen Widerstand und verstärkt die Magnetisirung um einen entsprechenden Betrag.

Von Waltenhofen verglich im Jahre 1870 die von zwei gleichen (kurzen) röhrenförmigen Spulen auf zwei Eisenkerne ausgeübte Anziehung. Einer von den beiden Eisenkernen bestand aus einem massiven cylindrischen Stabe, der andere aus einer Röhre von gleicher Länge und gleichem Gewicht. Die Röhre wurde kräftiger angezogen, als der massive Kern. Zweifellos erklärt die Wirkung der vergrösserten Oberfläche, die zur Verminderung des Widerstandes im magnetischen Kreise führt, die Ursache der Beobachtung.

Von Feilitzsch verglich die Wirkung einer röhrenförmigen Spule auf einen Kern aus weichem Eisen mit der Wirkung, die von der nämlichen Spule auf einen Kern aus hartem und magnetisirtem Stahl gleicher Abmessungen ausgeübt wird. Die Kerne zum Eintauchen (Fig. 109) waren 10,1 *cm* lang; die Spule besass 29,5 *cm* Länge und 4,2 *cm* Durchmesser. Der bei dem Versuche mit dem Stahlmagnet angewendete Strom war viel stärker als der Strom, der bei Verwendung des weichen Eisenkernes benutzt wurde. Nichts destoweniger ergab sich für den weichen Kern kräftigere Anziehung. Wurde der Stahlmagnet angewendet, so ergab sich ein Maximum der Anziehung, als er bis zur Tiefe von 5 *cm* eintauchte, während der Eisenkern das Maximum der Anziehung bei einer Tiefe von 7 *cm* erlangte, weil seine Magnetisirung mehr zunahm als die des Stahlmagnetes. Da das gleichförmige Feld bei ungefähr 8 *cm* Tiefe begann und die Kerne 10,1 *cm* lang waren, könnte man annehmen, dass die anziehende Kraft auf Null sänke,

Digitized by Google

wenn die Kerne bis zu einer Tiefe von etwa 18 *cm* eintauchten. In Wirklichkeit wurde der Nullpunkt etwas früher erreicht. Das

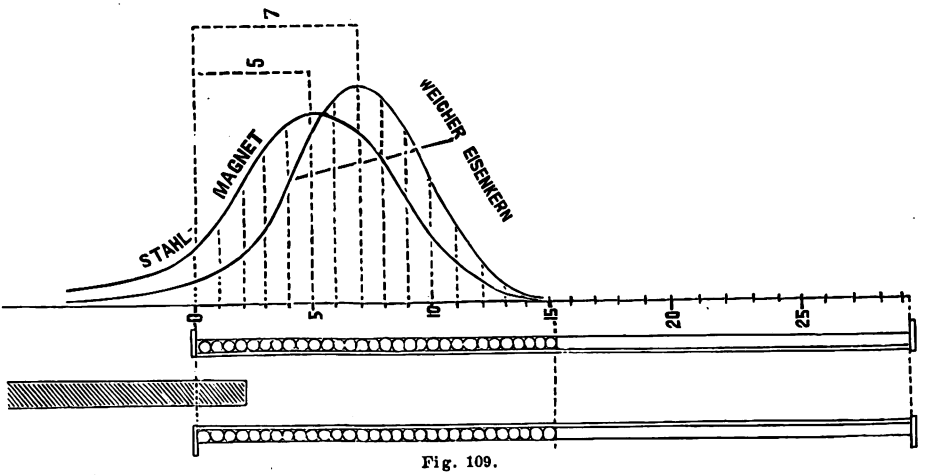


Fig. 109.

Maximum der Anziehung war bei dem eisernen Kern zum Eintauchen etwas grösser.

Die sorgfältigsten Untersuchungen hat Dr. Bruger im Jahre 1886 angestellt. Ein Versuch, bei dem ein cylindrischer eiserner Kern benutzt wurde, ist in der Figur 110 durch zwei Curven dargestellt. Bruger verwendete zwei Spulen, eine von $3^1/_2$ *cm*, die andere von 7 *cm* Länge. Diese sind in der Figur links unten angedeutet. Die Stärke des erregenden Stromes betrug etwas über 8 Ampère. Der cylindrische Kern war 39 *cm* lang. In dem Diagramm ist angenommen, dass der Kern von links in die Spule eintritt. Die Grösse der Anziehung in Gramm ergibt sich aus der Figur. Wie die beiden Curven durch ihre steilen Gipfel zeigen, tritt das Maximum der Anziehung ein, wenn

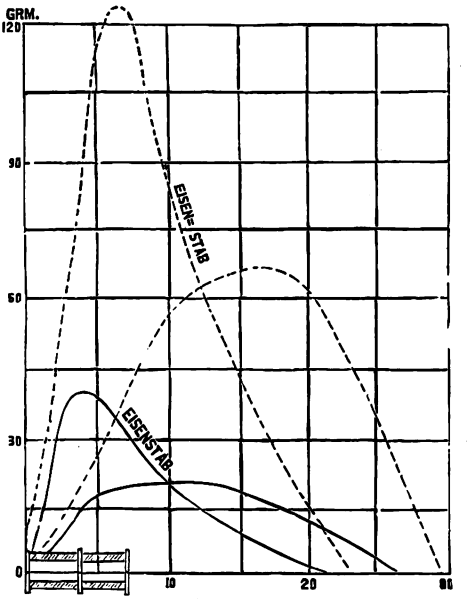


Fig. 110.

Digitized by Google

das Ende des Kernes aus der Spule hervorzutreten beginnt; die Anziehung fällt auf Null, wenn die Enden gleichweit aus der Spule hervorragen. In der Figur beziehen sich die gestrichelten Curven auf die Benutzung der langen Spule. Die Höhe des Gipfels ist bei der Spule von der doppelten Länge beinahe viermal so gross, da hier die doppelte Zahl von erregenden Ampère-Windungen vorhanden ist. In einigen anderen Versuchen, deren Ergebnisse in Figur 111 graphisch dargestellt sind, wurde derselbe Kern mit einer röhrenförmigen Spule von 13 *cm* Länge benutzt.

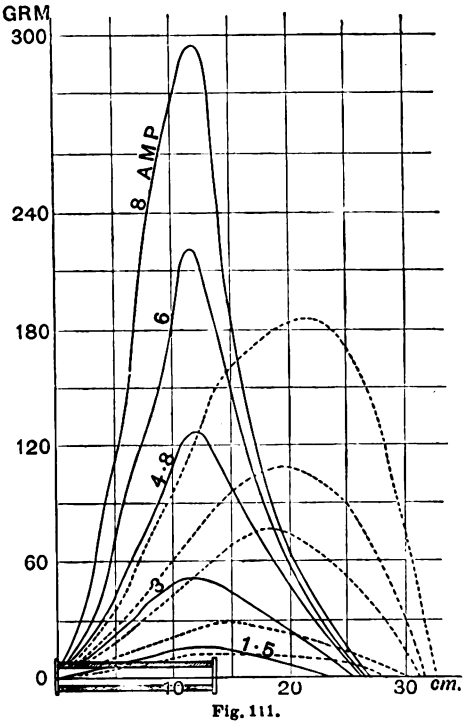


Fig. 111.

Benutzt man Ströme verschiedener Stärke, von 1,5 Ampère, 3; 4,8; 6 oder 8 Ampère, so ist in Folge dessen die Anziehung verschieden, aber man erhält die nämliche Wirkung; die grösste Anziehung tritt ein, wenn der Pol aus dem fernen Ende der röhrenförmigen Spule auszutreten beginnt. Es herrschen nur geringe Unterschiede; bei dem schwächsten Strome liegt das Maximum genau über dem Ende der Röhre, dagegen tritt bei stärkeren Strömen der Punkt des Maximums etwas weiter zurück. Wenn der Kern gut gesättigt wird, steigt die Kraftcurve nicht so bedeutend; die Umbiegung beginnt an einem früheren Punkte, und die Stelle des Maximums liegt von dem Rohrende etwas nach rückwärts. Dasselbe wurde von Von Waltenhofen bei Verwendung von Stahlmagneten beobachtet.

Wirkung
bei der Benutzung konischer Kerne zum Eintauchen.

Wenn anstatt eines cylindrischen Kernes ein zugespitzter verwendet wird, so ändert sich die Lage des Maximums der Anziehung vollständig, denn die Spitze genügt nicht, um alle magne-

Digitized by Google

tischen Kraftlinien, die im Eisenstab gebildet werden, zu fassen. Die Linien treten nicht alle an der Spitze aus, sondern sickern, so zu sagen, entlang den Seiten des Kernes hervor. Der Bereich, in dem die magnetischen Kraftlinien durch das Eisen in die Luft gelangen, ist nicht mehr ein bestimmter „Pol" am Ende, oder nahe dem Ende des Stabes, sondern ist über eine beträchtliche Oberfläche vertheilt. Wenn in Folge dessen die Spitze aus dem Ende der Röhre herauszutreten beginnt, befindet sich noch eine grössere Masse Eisen in der Röhre; die Anziehung wird, anstatt in dieser Lage zu einem Maximum zu gelangen, über einen grösseren Bereich sich vertheilen.

Macht man mit einer Federwage den Versuch, so beobachtet man einen merklichen Unterschied zwischen dem besprochenen Fall und dem bei Anwendung des cylindrischen Kernes. Die Anziehung wächst, sobald der Kern eintritt; aber das Maximum ist nicht so genau bei Verwendung des zugespitzten Kernes bestimmt, als bei Verwendung eines flach abgeschnittenen. Dieser wesentliche Unterschied zwischen conischen und cylindrischen Kernen wurde von Krizik entdeckt. Er hat die Entdeckung in dem Mechanismus der Pilsen-Bogenlampe angewendet. Conisch zugespitzte Kerne sind von Bruger ebenfalls untersucht worden. In der Fig. 111 sind sowohl die Curven, die der Benutzung eines kegelförmig zugespitzten Kernes entsprechen, als auch die Curven dargestellt, die sich auf die Benutzung des cylindrischen Eisenstabes beziehen. Wir bemerken, wie der kegelförmig zugespitzte Kern im Vergleich mit dem cylindrischen Kern niemals eine so grosse Anziehung ergibt, und wie das Maximum nicht eintritt, wenn die Spitze an der anderen Seite der Spule hervortritt, sondern wenn sie ein beträchtliches Stück an der anderen Seite der Spule hervorstand. Dieses trifft bei beiden Spulen, der kürzeren und der längeren Spule zu. Die punktirten Curven in der Fig. 111 stellen das Verhalten eines kegelförmig zugespitzten Kernes dar. Wurde die längere Spule verwendet, so tritt bei verschiedenen Stromstärken die grösste Anziehung ein, wenn die Spitze ein beträchtliches Stück aus der Spule hervorgetreten ist; das Maximum der Anziehung liegt, anstatt bei stark magnetisirender Kraft näher dem Eintrittsende zu, weiter. Der Wirkungsbereich war bei starken Strömen ausgedehnter als bei schwachen Strömen. Bruger untersuchte auch sehr unregelmässig gestaltete Kerne, die zum Beispiel dem Gewinde eines Korkziehers

Digitized by Google

glichen. Er fand dann eine sehr unregelmässige Kraftcurve. Die Prüfung in Betreff der Vertheilung der Anziehung auf verschieden gestaltete Kerne erfordert noch viele Arbeit. Bruger hat den Weg gezeigt, der ohne grosse Schwierigkeiten verfolgt werden kann.

Massive und hohle Kerne zum Eintauchen.

Oft wird angenommen, dass hohle Kerne zum Eintauchen ebenso gut als massive seien. Der Grund dieser Annahme liegt darin, dass bei Verwendung schwacher magnetisirender Kräfte, die das Eisen nicht beinahe sättigen, der grössere Theil der magnetisirenden Kraft aufgewendet wird, um das Hindurchtreten der magnetischen Kraftlinien durch den Luftrückweg zu bewirken. In Folge dessen hängt die Anziehung auf den Kern mehr von dem magnetischen Widerstand der Luft als von dem des Eisens ab. Bei Verwendung schwacher magnetisirender Kräfte wirken hohle Kerne daher ebenso gut als massive von dem nämlichen äusseren Durchmesser und der nämlichen Länge. Aber bei Verwendung starker magnetisirender Kräfte trifft dies nicht mehr zu, weil röhrenförmige Kerne eher gesättigt werden als massive. In der Fig. 112 ist das Verhalten eines röhrenförmigen Kernes im Gegensatz zum Verhalten eines massiven Kernes (No. 2) von gleichem äusseren Durchmesser dargestellt. Dieselbe Figur zeigt eine Curve für einen massiven Kern (No. 1) von kleinerem Querschnitt, aber von etwas grösserem Gewichte als das des röhrenförmigen Kernes. Bei Verwendung geringer magnetisirender Kräfte wird der massive Kern weniger stark magnetisirt, als der röhrenförmige, aber bei Verwendung grosser magnetisirender Kräfte wird der erste Kern stärker magnetisirt.

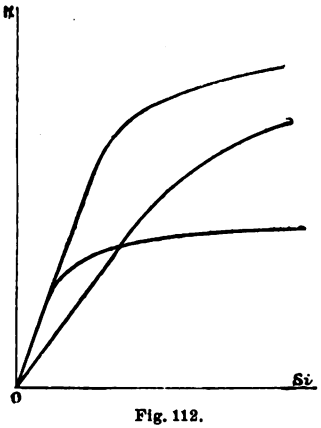


Fig. 112.

Andere Methoden zur Erweiterung des Wirkungsbereiches.

Durch Änderung der Vertheilung des Drahtes auf der Spule ändert sich die Vertheilung der Anziehung. Anstatt einen

Digitized by Google

konischen Kern, benutzt man eine konische Wickelung, in der die Windungen an einem Ende mehr als am anderen angehäuft werden. Eine solche Spule von allmälig wachsender Stärke wurde vor einigen Jahren von Gaiffe in seiner Bogenlampe benutzt; sie ist auch in Deutschland für Leupold patentirt worden. M. Trève hat die Anregung gegeben, eine Eisendrahtspule zu benutzen, um so den Magnetismus des stromführenden Eisens zu verwerthen. Trève erklärt, dass solche Spulen bei gleicher Stromstärke viermal so viel Anziehungskraft entwickeln. Wenn dies aber auch zutrifft, woran zu zweifeln ist, so kommt doch in Betracht, dass um einen gegebenen Strom durch einen Eisendraht, anstatt durch einen Kupferdraht von gleicher Masse fliessen zu lassen, der Strom durch einen sechs mal grösseren Widerstand zu treiben ist. Mithin ist sechs mal soviel Kraft aufzuwenden, um den Strom in gleicher Stärke zu erzeugen. Ferner ist der Vorschlag gemacht worden, die in dieser Art benutzte Spule in einer Eisenumkleidung einzuschliessen. Eisenumkleidete Solenoide sind zuweilen verwendet worden, sie vergrössern aber nicht den Wirkungsbereich; sie verhindern nur die Abnahme der inneren Anziehung in der Mündung der Spulen und machen die innere Anziehung auf Kosten der äusseren Wirkung gleichmässig. Ein eisenumkleidetes Solenoid wirkt praktisch genommen nach aussen hin gar nicht anziehend, nicht einmal auf einen Eisenkern, der im Abstande eines halben Durchmessers von der Oeffnung der Spule entfernt ist. Nur wenn der Kern in das Innere der Spule gelangt, beginnt die Anziehung, und die anziehende Kraft ist praktisch genommen im ganzen Innern der Spule gleichförmig. Im Jahre 1889 wollte ich von dieser Eigenschaft Behufs Anstellung einiger Versuche über die Wirkung von Magnetismus auf Licht Gebrauch machen, und hatte zu diesem Zweck durch Herren Paterson und Cooper die in der Figur 113 abgebildete grosse Spule bauen lassen. Sie ist aussen mit einer röhrenförmigen Eisenumkleidung sowie an jedem Ende mit einer starken eisernen Scheibe versehen, die in der Mitte eine runde Öffnung besitzt. Der magnetische Kreis ist um die Aussenfläche der

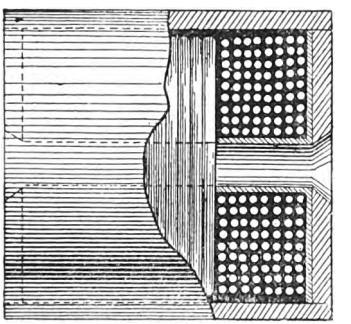


Fig. 113.

Digitized by Google

Spule herum praktisch genommen durch weiches Eisen vervollständigt. Man kann annehmen, dass ein vollkommen gleichmässiges magnetisches Feld von einem Ende der Röhre zum andern erzeugt wird; die Feldstärke nimmt nicht an den Enden ab, wie es geschehen würde, wenn der magnetische Kreis einen Luftrückweg besässe. Die Gesammtheit der Ampère-Windungen erregender Kraft wird zur Magnetisirung des inneren Raumes verwendet, in dem die Wirkungen deshalb sehr kräftig und gleichförmig sind.

Verschiedene Arten von Spulen mit Kern zum Eintauchen.

Als Abänderung der Spule mit Kern zum Eintauchen wird eine zweite Spule auf den Kern gewickelt. In diesem Falle hängt der Magnetismus des Kernes zum Theil von dem Strome in der ihn umgebenden Spule, zum Theil von dem Strome in der Spule zum Eintauchen ab. Der Kern sucht sich in solche Lage zu bringen, dass die Magnetisirung ein Maximum wird. Hjörth benutzte diese Abänderung; auch ist derselbe Gedanke in verschiedenen Bogenlampen zur Ausführung gelangt. In einer von Paterson und Cooper hergestellten Bogenlampe wird ein Kern mit Spule in eine röhrenförmige Spule gezogen; der Strom durchfliesst nacheinander beide Wickelungen. In einer anderen Bogenlampe der nämlichen Firma befinden sich zwei Spulen in getrennten Stromkreisen, eine Spule besteht aus dünnem und eine aus dickem Draht, die eine befindet sich in Hintereinanderschaltung und eine in Nebeneinanderschaltung mit dem Lichtbogen.

Differentialwickelung mit Kern zum Eintauchen.

Die nebenstehende Figur 114 stellt die ursprünglich von Siemens eingeführte Anordnung dar. Ein Kern wird an einem Ende in die Spule gezogen, die im Hauptstromkreis liegt, und an dem anderen Ende in eine Spule, die in einer Abzweigung liegt. Hier wird offenbar der Magnetismus des Kernes von den durch beide Umwindungen fliessenden Strömen abhängen und verschieden sein, je nachdem die Ströme in beiden Spulen in gleichem Sinne um den Eisenkern kreisen oder nicht. Es ist auch klar, dass, wenn ein Kern seine Enden in zwei Spulen taucht, die Magnetisirung von beiden Spulen abhängt; die resultirende Anziehung wird nicht einfach durch den Unterschied zwischen der Anziehung

Digitized by Google

der beiden besonders wirkenden Spulen bedingt. Die Figur 114 zeigt auch eine andere Abänderung derselben Anordnung, die der Wirkung der beiden Spulen grössere Unabhängigkeit verleihen soll. In diesem Falle ist die Magnetisirung jedes Kernes, praktisch genommen, nur abhängig von dem Strome in der eigenen Spule. Die beiden Kerne sind durch einen Messingstab oder einen Stab aus einem nicht magnetischen Metall mechanisch mit einander verbunden. Diese Anordnung besitzt einen Vorzug vor der ersteren und wird in der Regel in allen Fällen angewendet, in denen Wechselströme benutzt werden; denn bei solchen Strömen wirkt ein magnetischer Kern der von einer Spule zur andern reicht, wie der Kern einer Inductionsrolle; der Strom in der einen Spule wird Inductionsströme in der anderen Spule erregen. In allen Fällen, in denen Wechselströme vorwendet werden, müssen die Kerne zertheiltes Eisen enthalten; in der Regel wird eine gespaltene Röhre benutzt. Noch auf andere Art lässt sich differentiale Wirkung erzielen. In einigen Formen der Pilsen'schen Bogenlampe sind z. B. die konischen eisernen Kerne durch eine oben über eine Rolle laufende Schnur mit einander verbunden. Die konischen Kerne dieser Lampe sind

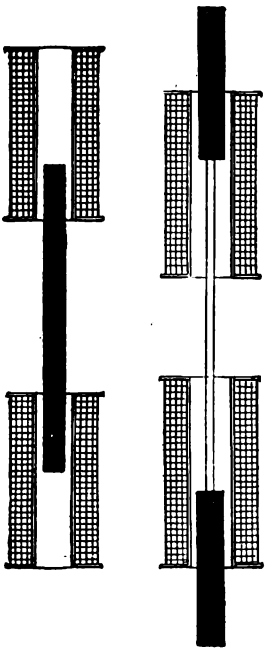


Fig. 114.

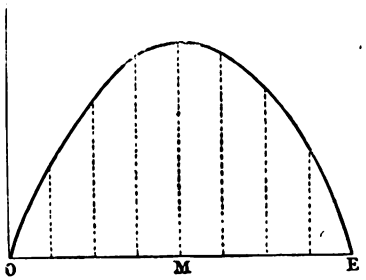


Fig. 115.

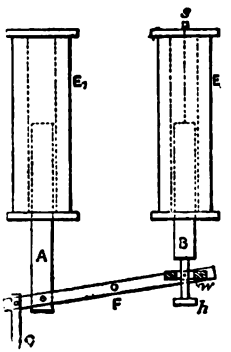


Fig. 116.

derart gestaltet und die Länge der Schnur ist so bemessen, dass die auf die Anziehung und die Wegestrecke sich beziehende Curve (Fig. 115) auf beiden Seiten der maximalen Anziehung (M) symmetrisch verläuft.

Digitized by Google

Die Figur 116 stellt eine andere Art differentialer Anordnung dar, die in der Lampe von Brockie-Pell und in andern Bogenlampen benutzt wird. Zwei getrennte Kerne sind an den beiden Enden eines Hebels befestigt. Man hat also getrennte magnetisirende Wirkungen. A ist ein Kern, der in die Spule E_1 tritt und mit dickem Drahte bewickelt ist, um den Hauptstrom zu leiten, während B in die mit dünnem Drahte bewickelte Spule E_2 tritt, die im Nebenschluss liegt.

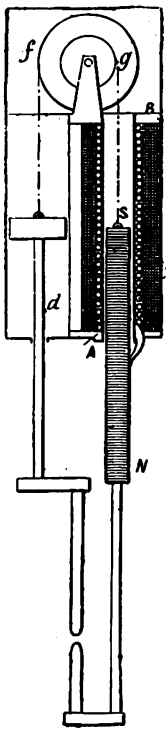


Fig. 117.

In einer weiteren Art differentialer Anordnung ist nur ein Kern und eine röhrenförmige Spule vorhanden, auf der zwei Drähte aufgewickelt sind, so dass die Wirkung auf den Kern von dem Unterschied der Ampère-Windungen der beiden besonderen, stromführenden Drähte abhängt. Durch den Mechanismus der in Figur 117 abgebildeten Bogenlampe von Menges wird dies dargestellt.

Spule und eine Spule zum Eintauchen.

Wenn man von der Verwendung des Eisens absieht, und nur zwei röhrenförmige Spulen benutzt, eine von grossem Durchmesser und die andere von kleinerem Durchmesser, die in die grössere Spule eintritt, so werden, wenn Strom in derselben Richtung durch beide Spulen fliesst, die Spulen sich anziehen. Diese Anordnung ist ebenfalls für Bogenlampen benutzt worden. Fliessen die Ströme in entgegengesetztem Sinne in beiden Spulen, so suchen sie sich abzustossen. In jedem Falle ist die gegenseitig wirkende Kraft in irgend einer Lage der Spulen proportional dem Producte ihrer bezüglichen Ampère-Windungen.

Abgetheilte Spule.

Abgetheilte Spulen mit Kern zum Eintauchen.

Von Page wurde ungefähr im Jahre 1850, als er eine Form der Spule mit Kern zum Eintauchen herstellte, die einen unbegrenzt langen Wirkungsbereich besass, eine wichtige Entdeckung gemacht. Die bewickelte Röhre besass anstatt einer auf ihrer ganzen Länge gleichzeitig vom Strome erregten Wickelung eine Anzahl besonderer Abtheilungen oder bestand aus kurzen

Digitized by Google

Röhren und war mit der Einrichtung versehen, den elektrischen Strom in jeder Abtheilung zu schliessen. Tritt dann der Eisenkern eben gerade in irgend eine Abtheilung ein, so wird der Strom in dieser Abtheilung geschlossen. Sobald das Ende des Kernes durch diese Abtheilung hindurch geht, wirkt der Strom in der nächst folgenden Abtheilung. In dieser Weise kann die Anziehung längs einer Röhre von unbegrenzter Länge erhalten werden. Page stellte nach dieser Anordnung eine Triebmaschine her, die später wieder von Du Moncel und nochmal durch Marcel Deprez in seinem elektrischen Hammer (Figur 200) ins Leben gerufen wurde.

Wirkung des magnetischen Feldes auf eine kleine Eisenkugel.

Bei Erörterung der Wirkung röhrenförmiger Spulen auf Eisenkerne wurde gezeigt, dass, wenn ein sehr kurzer Kern in ein gleichmässiges magnetisches Feld gebracht wird, er in keiner Richtung einen Zug erfährt. Wendet man als Kern eine kleine Kugel aus weichem Eisen an, so zeigt die Kugel, selbst wenn sie in das stärkste magnetische Feld gebracht wird, kein Bestreben, sich in irgend einer Richtung zu bewegen, sofern das Feld wirklich gleichmässig ist. Ist das Feld nicht gleichmässig, so bewegt sich die Kugel von der Stelle, in der das Feld schwächer ist, nach einem Punkte, in dem das Feld stärker ist. Eine Kugel aus Wismuth oder aus Kupfer sucht sich im Gegentheil von der Stelle, an der das Feld stark ist, nach einer Stelle zu bewegen, an der das Feld schwächer ist. Dies ist die Erklärung der als „diamagnetisch" bezeichneten Wirkungen, die seiner Zeit irrthümlich einer angenommenen diamagnetischen Polarität im Gegensatz zur gewöhnlichen magnetischen Polarität zugeschrieben worden sind. In einfacher Weise lassen sich die Thatsachen dadurch festlegen, wenn man sagt, dass die kleine Eisenkugel sich dem ansteigenden magnetischen Felde zu mit einer Kraft zu bewegen sucht, die dem Ansteigen proportional ist, während (in der Luft) eine Kugel aus Wismuth oder aus Kupfer sich mit einer schwachen Kraft abwärts der Steigung zu bewegen sucht. Ein kleines Stück weichen Eisens — zum Beispiel ein kurzer Cylinder — zeigt dasselbe Verhalten wie eine kleine Kugel. Bei einigen Strom- und Spannungsmessern (die mit Streifen bewickelt sind) sowie einigen Strommessern von William Thomson wird der Vorgang verwendet.

Digitized by Google

Elektromagnete mit weitem Wirkungsbereich. Zwischenformen.

Der im vorigen Kapitel betrachtete Apparat der Spule mit Kern zum Eintauchen übt bei einem gegebenen Gewicht von Kupfer und Eisen an irgend einer Stelle des ausgedehnten Bewegungsbereiches keine so grosse Kraft aus, wie sie in einem sehr kurzen Wirkungsbereiche erlangt werden kann, wenn die feststehenden Kernformen eines Elektromagnetes benutzt werden. Manche Erfinder haben deshalb Elektromagnete herzustellen versucht, die einen ausgedehnteren Bewegungsbereich ihres Ankers besitzen als für die gewöhnlichen Stab- und Hufeisenform zutrifft, ohne indess allzusehr die kräftige, durch die feststehenden Eisenkerne hervorgebrachte Anziehung zu opfern. Für gewisse Zwecke ist die Herstellung eines Elektromagnetes erwünscht, der, während er die kräftige Anziehung des Elektromagnetes besitzt, in seinem begrenzten Wirkungsbereich eine mehr gleichmässige Anziehung ausübt, wie solche im Wirkungsbereiche der Spule mit Kern zum Eintauchen stattfindet. Unter den verschiedenen Vorschlägen für Elektromagnete mit weitem Wirkungsbereich muss die erste Stelle denjenigen Formen eingeräumt werden, die eine Stelle zwischen der Spule mit Kern zum Eintauchen und den Formen mit festem Kern einnehmen.

Abgeschlossene Spulen.

Eine Form von Elektromagneten dieser Klasse besteht aus einem in einer röhrenförmigen Spule wirkenden Kern zum Eintauchen. In der Spule ist aber ein kurzer fester Kern eingesetzt, der die Röhre auf eine gewisse Strecke abschliesst. Der Elektromagnet von Boncelli, der in Figur 30 abgebildet ist, gehört in diese Kategorie. Die Kraft, mit der der bewegliche Theil des Kernes in die Spule gezogen wird, ist, da die Wirkung des feststehenden Theiles mit in Betracht kommt, etwas grösser als dies bei offener Spule der Fall sein würde. Ist der bewegliche Theil eingetreten, so wird er mit einer Kraft angezogen, die sehr stark mit der Verkleinerung des Zwischenraumes im magnetischen Kreise zunimmt. Es möge in Bezug hierauf auf eine frühere Stelle in diesem Kapitel, S. 224, verwiesen werden.

Ein anderes Beispiel liefert (Fig. 118) der Magnet zum Eintauchen in der Bogenlampe von Brush. Von einem Paar röhren-

Digitized by Google

förmiger Spulen enthält jede einen Kern zum Eintauchen. Die Kerne sind durch ein Joch miteinander verbunden. Oberhalb wird der magnetische Kreis theilweise durch eine Eisenplatte vervollständigt. Es ist demnach der Vortheil eines ziemlich vollständigen magnetischen Kreises, vereint mit einer verhältnissmässig weiten Bewegungsstrecke des Kernes vorhanden. Die Anziehung ist bei einigen dieser Formen aber nicht auf der ganzen Bewegungsstrecke gleich; sie wächst, wenn der magnetische Kreis vollständiger wird.

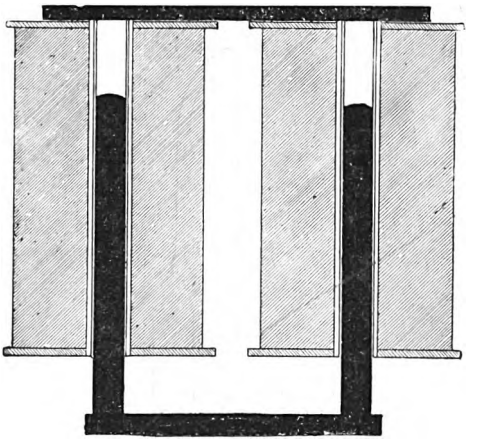


Fig. 118.

Figur 119 stellt eine eigenthümliche Form eines Elektromagnetes dar, der die Gestalt des mit Eisen umkleideten Elektromagnetes mit derjenigen des beweglichen Kernes verbindet. Die Anordnung besitzt einen begrenzten Wirkungsbereich, aber innerhalb dieses Bereiches grosse Kraft, die von dem vorzüglichen magnetischen Kreise herrührt. Diese Anordnung wurde 1870 von Stevens und Hardy für eine elektrische Triebmaschine bestimmt, die eine Nähmaschine antreiben sollte. Eine ähnliche Form wird für die Bogenlampe von Weston benutzt.

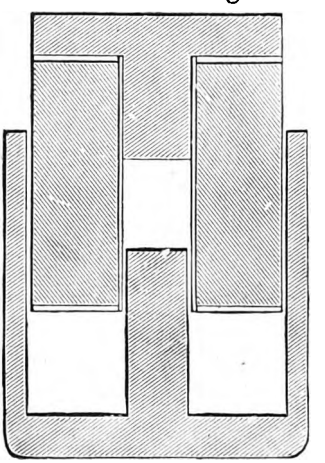


Fig. 119.

In der Bogenlampe von Rankin Kennedy, deren Mechanismus in Figur 120 dargestellt ist, wird ein ähnlicher Elektromagnet benutzt. Es wird indessen die Wirkung dieses Elektromagnetes M, der im Hauptstromkreis der Lampe liegt, und der mit einer kräftigen Anziehung und mit Sicherheit arbeiten muss, zum Theil gegen die Wirkung einer Nebenschlusswickelung S, die auf einen mit dem Kern P_1 durch eine Schnur und eine Rolle verbundenen zweiten Kern P_2 einwirkt, ausgeglichen. Die Wirkung wird demnach von dem Augenblick an differential, in dem der Bogen gebildet worden ist.

Digitized by Google

Eine von Holroyd Smith im Jahre 1877 erfundene Form eines Elektromagnetes zum Eintauchen gleicht der umgekehrten Figur 119; die Spule ist mit Eisenumkleidung versehen, während der an dem Kopfe mit einer eisernen Scheibe versehene Kern in

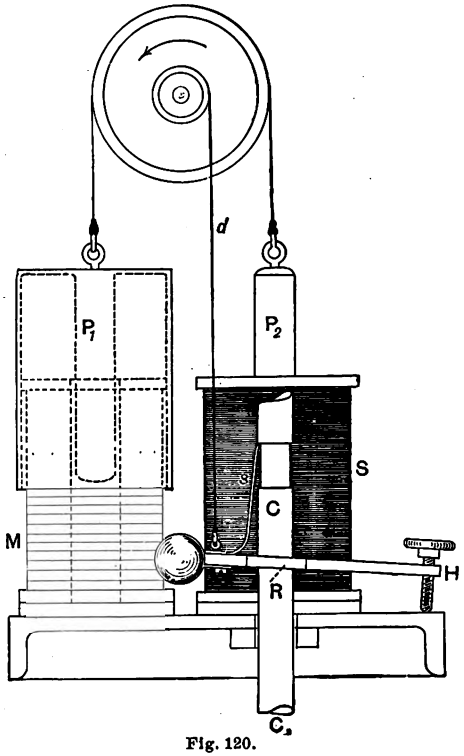


Fig. 120.

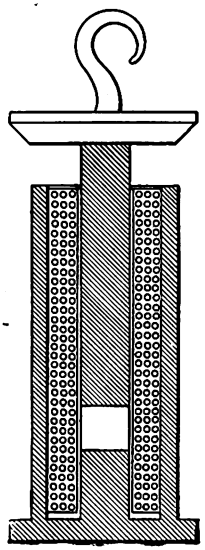


Fig. 121.

die Röhre hinabgeht, um auf dem Boden mit dem Eisen zusammen zu kommen. Die Anordnung ist in der Figur 121 dargestellt. Eine sehr ähnliche Form wird für einen Eisenbahn-Elektromagnet von Timmis und Currie angewendet.

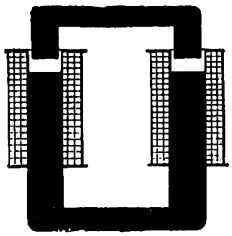


Fig. 122.

Eine andere Zwischenform rührt von Roloff her. Dieser stellte seine Elektromagnete nicht mit ausserhalb hervorstehenden, sondern mit versenkten Eisenkernen her (Fig. 122), während der Anker mit kleinen Ansätzen versehen war, die in die hervorragenden röhrenförmigen Spulenenden herab reichen. Einige Bogenlampen besitzen Magnete von gleicher Form, mit einem kurzen Kern zum Eintauchen, der in eine röhrenförmige Spule eintritt und in der Hälfte der Röhre mit einem kurzen feststehenden Eisenkern zusammentrifft.

Digitized by Google

Figur 123 stellt eine Form eines röhrenförmigen mit Eisenumkleidung ausgestatteten Elektromagnetes dar, der von Ayrton und Perry im Jahre 1882 benutzt wurde. Eine Spule ist mit einer Eisenumkleidung versehen und besitzt eine ringförmige eiserne Scheibe über dem Kopfende, ferner eine ringförmige eiserne Scheibe quer über dem Boden; es ist auch eine kurze innere Röhre von Eisen vorhanden, die ein wenig vom Kopfende ebenfalls sich ausdehnt, und beinahe mit der anderen inneren Röhre von Eisen, die von der Grundfläche ausgeht, zusammentrifft. Die magnetische Wirkung der eingeschlossenen Kupferumwickelung ist auf einen sehr kurzen Raum zwischen den beiden Enden der inneren Röhren beschränkt, wo ein sehr starkes gleichmässiges magnetisches Feld herrscht. Der Wirkungsbereich lässt sich nach Belieben durch die Verkürzung oder Verlängerung der inneren Röhren ändern. Ein unten eingesetzter Eisenstab mit oben angesetzter Messingführung wird mit grosser Kraft und gleichmässigem Zuge von einem zum anderen Ende dieser inneren Röhren gezogen.

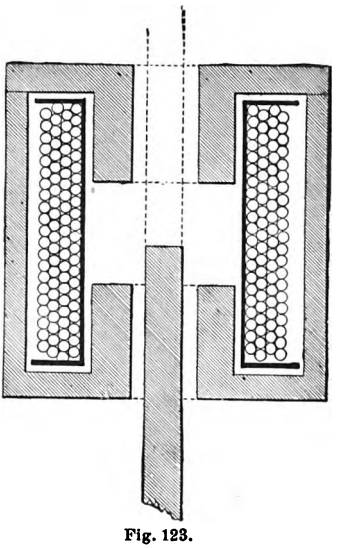


Fig. 123.

Mit den zuletzt beschriebenen beiden Anordnungen und mit der Figur 132 möge noch der Vorschlag von Gaiser (Fig. 124), der auf die Erlangung eines grösseren Wirkungsbereiches mittels eines gewöhnlichen Elektromagnetes mit cylindrischen Kernen abzielt, verglichen werden. Die Spule ist so kurz, dass sie das vorstehende Ende des Kernes nicht bedeckt. Der Anker besteht aus einem Streifen Eisenblech, der so gebogen ist, dass er die Pole umgibt.

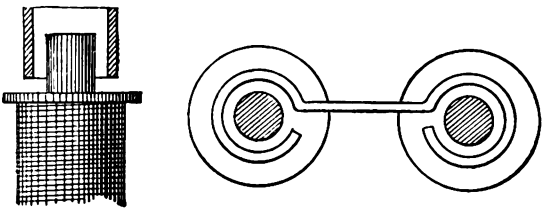


Fig. 124.

Andere Anordnungen zur Ausdehnung des Wirkungsbereiches und zur Herstellung der gleichmässigen Anziehung von Elektromagneten fallen in das Gebiet des nächsten Kapitels, das die systematische Darstellung der elektromagnetischen Apparate enthält.

Digitized by Google

Kapitel IX.

Elektromagnetische Apparate.

Der Elektromagnet wird zu mechanischen Einrichtungen und Zwecken auf mannigfache Weise und in einer so besonderen Art verwendet, dass sein Gebrauch einen neuen Zweig der allgemeinen Wissenschaft der Mechanik eröffnet hat. In diesem neuen Zweige fehlt es aber noch sehr an einer systematischen Eintheilung. Ein halbes Jahrhundert ist verflossen, seit Willis in Cambridge die Mechanik im Allgemeinen in ein gewisses System brachte. Das von ihm begonnene Werk ist vor etwa zwanzig Jahren durch Reuleaux in seiner grossen Abhandlung über Kinematik des Maschinenwesens zu einem nahezu vollkommenen System durchgebildet worden. Bis jetzt ist es aber noch nicht möglich gewesen, alle Formen der elektromagnetischen Apparate auf Systeme elektromagnetischer Paare zurückzuführen. Indessen kann man sich mit einer allerdings rohen Eintheilung behelfen. Es soll daher diesem Kapitel eine einfache und bestimmte Aufzählung aller verschiedenen Arten der bis jetzt bekannten elektromagnetischen Apparate vorausgeschickt werden.

Elektromagnetische Apparate.

I. Elektromagnete.
   - A. Mit fester Spule und festem Kern; der Anker ist beweglich:
     1. Kurzer gedrängter magnetischer Kreis, für Zugkraft bei Berührung.
     2. Ausgedehnter Stromkreis und dicke Spule, für Anziehung in der Entfernung.
     3 Besondere Formen: mit Eisenmantel, einschenkelige, geblätterte, mit Folgepolen, vielpolige u. s. w.
   - B. Mit festen röhrenförmigen Spulen und beweglichem Kern zum Eintauchen:
     1. Der eintauchende Kern ist länger als die Spule.
     2. Der eintauchende Kern ist kürzer als die Spule.

Digitized by Google

3. Der eintauchende Kern besitzt besondere Form: kegelförmige, geblätterte u. s. w.
4. Spulen in Abtheilungen für aufeinander folgende Wirkung hergestellt.

C. Mittelformen. Abgeschlossene Spulen.
D. Fester Magnet und bewegliche Spule.
E. Feste röhrenförmige Spule und bewegliche Spule.

II. Elektromagnete unter der Wirkung von Gegenkräften.
1. Gewicht als Gegenkraft.
2. Federn als Gegenkraft.
3. Magnete als Gegenkraft.

III. Abgleichungen für Elektromagnete.
1. Elektrischer Abgleich.
2. Anschlagfedern.
3. Schwingende Hebel.
4. Gelenkbewegungen.
5. Daumen-Abgleich mit besonders geformten Polflächen.

IV. Elektromagnetische Daumen. Einrichtungen, die auf der seitlichen Annäherung einer besonders geformten Poloberfläche beruhen.

V. Elektromagnetische Gelenke. Einrichtungen, die auf gegenseitiger Wirkung zweier oder mehrerer getrennter Elektromagnete beruhen.

VI. Apparate, die auf elektromagnetischer Abstossung beruhen.
1. Gegenseitige Abstossung paralleler Kerne.
2. Ausdehnung verbundener oder röhrenförmiger Kerne.

VII. Polarisirte elektromagnetische Apparate.
1. Elektromagnet mit parallelem polarisirtem Anker.
2. Elektromagnet mit querliegendem polarisirtem Anker.
3. Spule mit eintauchendem polarisirtem Kern.
4. Polarisirter Magnet mit Gegenfeder (Magnet von Hughes).
5. Fester Dauermagnet mit beweglicher Spule.

VIII. Elektromagnetische Apparate mit schwingenden Theilen.
A. Nicht polarisirte.
1. Kreis zum Unterbrechen.
2. Kreis zum Kurzschluss.
3. Differential gewickelte.

B. Polarisirte.
1. Einfach wirkende.

Digitized by Google

2. Mit polarisirtem beweglichem Theile.
3. Mit polarisirtem festem Theile.

IX. Elektromagnetische Apparate mit umlaufenden Theilen.
1. Mit fester Spule, beweglicher Nadel.
2. Mit festem Magnet, beweglicher Spule.
3. Mit fester und beweglicher Spule.
4. Elektromagnete mit drehbarem Anker, schräg gelagert.
5. Draht, um den Magnetpol sich drehend.
6. Kupferscheibe, zwischen Polen sich drehend.
7. Pol, um den stromführenden Draht sich drehend.
8. Um seine Axe unter Wirkung des Stromes sich drehender Magnet.
9. Gebogene röhrenförmige Spule und S-förmiger eintauchender Kern.
10. Schräge Annäherung des Ankers.
   a. Wheatstones Daumenanker.
   b. Froments Anker.

X. Elektromagnetische Zahngetriebe.
1. Magnetische Hemmung.
2. Elektromagnetische Zahn-Kuppelungen.

XI. Elektromagnetische Apparate für Adhäsionswirkung.
1. Magnetische Frictionsgetriebe.
2. Magnetische Bremsen für Wagen.
3. Magnetische Kuppelung.
4. Magnetische Ausscheidungsapparate und Einrichtungen zum Sammeln von Erzen.

XII. Einrichtungen für Wechselstrom.
1. Vom Pole zurückgeworfene Kupferleiter.
2. Polschutz durch Kupferdämpfer.
3. Bewegung eines magnetischen Feldes durch zwei Ströme in verschiedenen Phasen.
4. Bewegung des Magnetpols durch stossende Wirkung von Spulen.

Das allgemeine Gesetz elektromagnetischer Systeme.

Alle diese sehr verschiedenen Formen elektromagnetischer Einrichtungen beruhen auf einem einfachen Gesetze oder leitenden Grundsatz, der aber seither noch nie voll erkannt oder in seiner Allgemeinheit ausgesprochen wurde. Eine Annäherung an ein

Digitized by Google

allgemeines Gesetz gab Maxwell in seiner Abhandlung über Elektricität und Magnetismus, wo er im Artikel 490 von der Kraft handelt, die für jede Verschiebung des Stromes im magnetischen Felde aus der Theorie der magnetischen Schalen, wie sie Ampère vorgeschlagen hat, hergeleitet werden kann. Er fügt dann hinzu: — „Auf jeden Theil des Stromkreises wirkt daher eine Kraft ein, die ihn durch die Linien der magnetischen Induction treibt, sodass eine grössere Zahl dieser Linien innerhalb des Stromkreises eingeschlossen wird.“ So wichtig die Erweiterung des Gedankenganges war, so findet sich in dem Satze nicht, dass man irgend eine Wirkung zwischen den anderen Elementen des Systems annehmen könnte, nämlich jenen Theilen ausser dem stromführenden Schliessungskreise, von denen die Zahl und Vertheilung der magnetischen Kraftlinien abhängt, die vom Stromkreise eingeschlossen werden. Man findet dort Nichts, das auf solche elektromagnetische Systeme anwendbar wäre, wie das in den Figuren 64 und 67 dargestellte, oder auf die zu beschreibenden Daumen, oder auf die Einrichtungen für Abstossung bezogen werden könnte.

Ein allgemeineres Gesetz muss auch Folgendes enthalten:

Jedes elektromagnetische System besteht aus einzelnen Theilen, Kupfer oder einem anderen, elektrische Ströme führenden Leiter, aus Eisen oder anderem magnetischen Material (einschliesslich Luft oder selbst weniger durchlässigem Mittel); diese Theile bilden den Weg für eine magnetische Strömung, die von der magnetomotorischen Kraft des Stromes herrührt, auch theilweise oder ganz unabhängigem Magnetismus ihre Entstehung verdankt.

Die Theile des Systems besitzen in jedem Augenblick eine gewisse Gestaltung. In irgend einer bestimmten Gestaltung der Theile (bei bestimmten Strömen) ist eine bestimmte Zahl magnetischer Linien vorhanden, die vom leitenden Stromkreise eingeschlossen werden. Viele Linien können durch mehr als eine Windung des leitenden Stromkreises treten. Wie die Gestaltung auch verwickelt sei, so wird es immer möglich sein, die Art und Grösse der Änderung festzustellen, die durch Verschiebung irgend eines Theiles in dem ganzen Zusammenschluss der magnetischen Linien mit dem leitenden Stromkreise hervorgerufen wird, möge jener Theil nun einen Leiter des elektrischen Stromes oder einen Leiter der magnetischen Linien bilden. Jede Verschiebung eines Theils

Digitized by Google

des Systems, ob Eisen oder Kupfer, die darauf hinzielt, den Zusammenschluss der magnetischen Linien durch den leitenden Stromkreis zu vergrössern, findet mechanisch eine Mitwirkung durch die wechselseitigen Kräfte des Systems. Andererseits hat jede Verschiebung, ob an Kupfer oder an Eisen, die den Zusammenschluss der magnetischen Linien durch den leitenden Kreis vermindert, mechanisch einen Widerstand an der wechselseitigen Rückwirkung im System zu überwinden. Wir können somit das allgemeine Gesetz in folgendem Ausdruck zusammenfassen:

Jedes elektromagnetische System zeigt das Bestreben, die Gestaltung seiner Theile so zu ändern, dass die Strömung der magnetischen Linien durch den leitenden Kreis ein Maximum wird.

Es ist kaum nöthig, diesen Grundsatz bis in Einzelheiten zu verfolgen. Die Eisentheile des magnetischen Kreises sind stets Kräften unterworfen, die den Stromkreis so gedrungen als möglich zu machen suchen, indem sie entweder die Länge des Kreises verkürzen oder seinen Querschnitt vergrössern. Anker werden angezogen, um die Zwischenräume im Kreise so viel als möglich zu schliessen. Eiserne Kerne zum Eintauchen werden in die Erregerspulen hineingezogen. Spulen, die parallele Ströme führen, werden gezwungen, das Eisen zu umschliessen: sie werden auch veranlasst, einander so weit als möglich sich zu nähern. Eine stromführende Schraubenspule mit losen Windungen (durch die ein Strom fliesst) sucht sich zusammenzuziehen; sie wird dies sogar noch um so kräftiger thun, wenn ein Eisenstab eingesteckt ist. Der magnetische Kreis sucht sich stets gedrungener zu gestalten. Anders verhält sich der elektrische Stromkreis: er hat das Bestreben, sich so zu erweitern, um einen möglichst grossen Raum zu umschliessen und so eine grössere magnetische Strömung zu umfassen. Ein biegsamer stromführender Leiter sucht sich um einen inneren eisernen Kern herum aufzuwinden. Ein Bündel Eisendrähte, das als Kern in einer Wickelung benutzt wird, sucht seinen Gesammtquerschnitt durch eine anscheinende seitliche Abstossung zu erweitern. Jeder Fall mechanischer Bewegung der Theile fällt unter das oben erwähnte Gesetz. Wir haben auf Seite 44 gesehen, dass in dem einfachen Falle, in dem eine Strömung von N magnetischen Linien durch einen Kreis eingeschlossen oder in einem Stromkreis vereinigt wird, in dem der Strom die Stärke von i Ampère besitzt, die wechsel-

Digitized by Google

seitige Energie des Systems (d. h. die von dem System bei Annahme seiner Gestalt geleistete Arbeit) dem Product Ni proportional ist. In einem verwickelteren System wird die wechselseitige Energie durch eine Summe von Werthen dargestellt oder durch ΣNi. Angenommen, irgend ein Theil des Systems erhalte in irgend einer Richtung eine Verschiebung dx, so wird dadurch die Summe der Energie im System verändert. Man kann den sich ergebenden Werth der Änderung mit $d\Sigma Ni$ bezeichnen. Dann wird die Kraft f, die der Verschiebung Widerstand leistet, gleich $\frac{d\Sigma Ni}{dx}$ sein. Je mehr jedoch die wechselseitige Energie im System bei der Verschiebung geändert wird, um so mehr wird die Kraft der Änderung widerstehen. Ein passendes Bild wird durch die Kräfte dargestellt, die sich bei einer Eisenkugel an verschiedenen Punkten längs der Achse einer langen hohlen Schraubenspule oder einer röhrenförmigen stromführenden Spule (siehe S. 222) wirksam zeigen. Wird die Kugel irgendwo nahe in die Mitte der Spule gebracht, so wird sie nicht merklich angezogen: ihre Verschiebung kann eine geringe oder keine Änderung in der gegenseitigen Energie des Systems hervorrufen. Bringt man sie jedoch gerade in die Mündung der Spule, so wirkt eine erhebliche Kraft, die sie in die Spule hineinzuziehen sucht; selbst eine geringe Verschiebung wird die gegenseitige Energie des Systems stark beeinflussen.

Nach Erörterung dieses leitenden Grundsatzes gehen wir zur Besprechung der elektromagnetischen Vorrichtungen über.

I. Elektromagnete im Allgemeinen.

In der Übersicht zu Eingang des Kapitels ist die Abtheilung I mit der Überschrift „Elektromagnete“ nur eine kurze Aufzählung des vorhergehenden Kapitels dieses Buches, so dass gleich die folgende Abtheilung behandelt werden kann.

II. Apparate, in denen Gegenkräfte verwendet werden.

Wenn ein Anker unterhalb eines Poles eines Elektromagnetes und zwar in einiger Entfernung angebracht und nicht etwa durch eine andere Gegenkraft als die des eigenen Gewichts zurückgehalten wird, so ist klar, dass eine bestimmte Stärke des elektrischen Stromes eben ausreicht, den Elektromagnet genügend zu magnetisiren, so dass er den Zug der Schwerkraft überwindet und den Anker hebt; hat die Bewegung des Ankers einmal

Digitized by Google

begonnen, so verbessert seine Annäherung die magnetische Strömung und verstärkt die Bewegung, so dass der Anker nach dem Pol zu getrieben wird. Ein starker Strom wird in diesem Falle nichts mehr ausrichten, als ein Strom, der gerade stark genug ist, die Wirkung zu vollbringen. Wenn ein solcher Anker nicht nur der Schwerkraft unterworfen ist, sondern einer Federkraft von der Beschaffenheit, dass die Gegenkraft der Feder in dem Maasse, wie der Anker den Polen näher rückt, vergrössert werden soll, so wird ein schwacher Strom nur eine geringe, ein stärkerer eine grössere Bewegung hervorbringen. Es wird eine bestimmte Lage des Ankers geben, die allen verschiedenen Stromstärken innerhalb der Arbeitsgrenzen des Apparates entspricht. Eine geeignet gewählte Feder oder eine Verbindung von Federn kann dann dazu benutzt werden, die Bewegung des Ankers in mehr oder weniger genauem Verhältniss zum elektrischen Strome zu regeln.

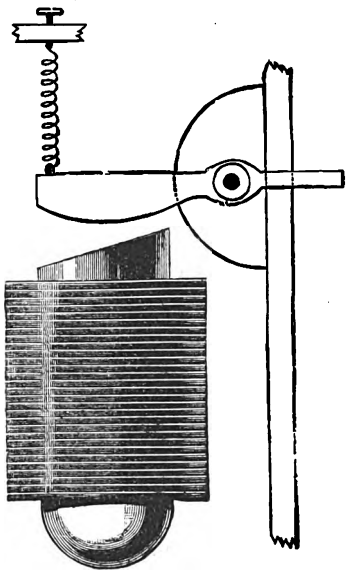


Fig. 125.

Schon im Jahre 1838 schlug Eduard Davy in einem seiner Patente auf Telegraphenapparate den Gebrauch einer Gegenfeder vor, um die Bewegung des Ankers zu regeln (Fig. 125). Man hat zu verschiedenen Zeiten angenommen, dass der Anziehung eines Elektromagnetes auf seinen Anker eine Gegenkraft durch Verwendung eines Dauermagnetes aus Stahl auf der entgegengesetzten Seite des Ankers an Stelle einer Feder ertheilt werden könnte. Es ist jedoch klar, dass diese Anordnung (und noch im höheren Maasse) der Beurtheilung unterliegt, die der Gebrauch eines Gewichtes als Gegenkraft bedingt, dass nämlich bei einer solchen Einrichtung ein stärkerer Strom nichts mehr ausrichtet, als ein solcher, der gerade stark genug ist, die Wirkung zu vollbringen.

III. Abgleichung der Anziehung.

Man hat verschiedene Mittel erdacht, um den Bereich der Bewegung zu vergrössern, oder deren Grösse in verschiedenen

Digitized by Google

Theilen des Bereiches zu ändern, um dadurch die sehr ungleichmässige Anziehung gleichmässig zu gestalten. Verschiedene solcher Einrichtungen, einige elektrischer, andere mechanischer, weitere elektromagnetischer Art, sind vorhanden. Zunächst kommt eine rein elektrische Art in Betracht. André schlug vor, der Anker solle, sobald er sich zu nähern angefangen hat und zu der Stelle gelangt, an der er stärker angezogen wird, von selbst einen Anschlag machen; dadurch sollte ein Theil des Stromes abgezweigt und der Magnetismus weniger kräftig gemacht werden. Burnett schlug ein anderes Mittel vor. Eine Anzahl besonderer Elektromagnete wirkt auf einen Anker; sobald Letzterer sich nähert, wird ein Elektromagnet nach dem andern aus dem Stromkreise ausgeschaltet. Die Vortheile dieser Anordnung sind sehr fraglich.

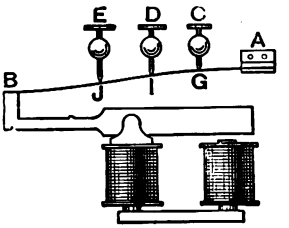


Fig. 126.

Die Anziehungskraft eines Elektromagnetes vergrössert sich so rasch, als der Anker sich der Berührung nähert. Man hat daher viele rein mechanische Einrichtungen angegeben, die Bewegung durch Gegenkräfte unter solchen Bedingungen abzugleichen, dass sie eine grosse Kraft ausüben müssen, wenn der Anker in geringer Entfernung sich befindet, schwache Kraft dagegen, wenn er weiter entfernt ist. Anschlagfedern können zur Leistung dieser Arbeit angeordnet werden.

Eine Einrichtung dieser Art (Fig. 126) besteht aus einer einzelnen Stahlfeder, hinter der in verschiedenen Entfernungen eine Anzahl Anschlagschrauben sich befindet, so dass bei der Annäherung des Ankers die Feder sich versteift; sie wurde von Calland angegeben.

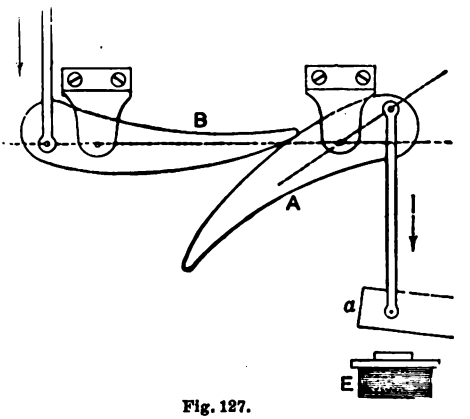


Fig. 127.

Bei einer anderen Methode von Robert Houdin wird ein Hebelwerk verwendet. Figur 127 beschreibt einen von Robert Houdins Abgleichern, Repartiteur genannt. Der Zug des Elektromagnetes auf den Anker wirkt auf einen gekrümmten Hebel, der

Digitized by Google

gegen einen zweiten Hebel drückt; der Angriffspunkt zwischen dem einen und dem anderen ändert sich mit ihrer Lage. Befindet sich der Anker weit vom Pol, so drückt der Arm des ersten Hebels nur schwach auf den zweiten. Diese Anwendung des Hebels wurde von Houdin durch Duboscq übernommen und in der Bogenlampe von Duboscq durchgeführt, in der die Stellvorrichtung am Fusse der Lampe den Hebel enhält.

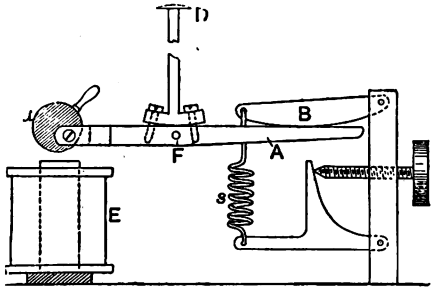


Fig. 128.

In dieser Form (Fig. 128) spielt ein gekrümmter Hebel *B* gegen einen anderen geraden Hebel *A*.

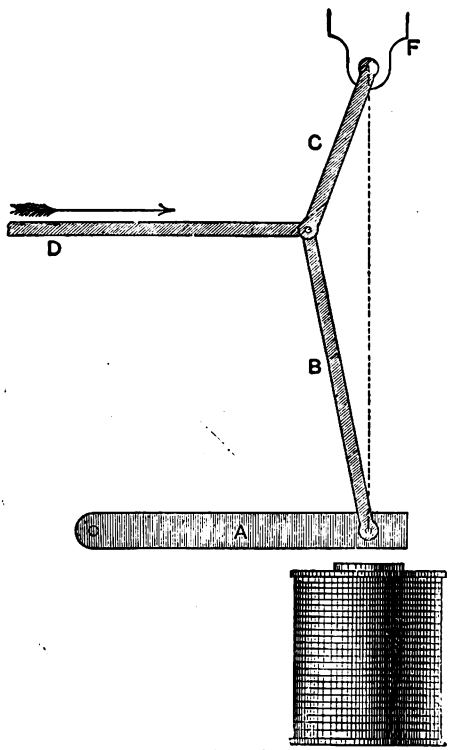


Fig. 129.

Eine ähnliche Vorrichtung zum Abgleich der Arbeit kommt in der Bogenlampe von Serrin zur Anwendung; eine der Federn, die den Rahmen hält, ist an dem Ende eines schwingenden Hebels befestigt, um den Zug des Regulir-Elektromagnetes abzugleichen. Wenn die Krümmung des einen Hebels oder beider Hebel geeignet gekrümmt gestaltet wird, so kann man den Zug des Magnetes in gewünschten Verhältnissen über einen Bewegungsbereich vertheilen, der dieselbe Ausdehnung, wie die ursprüngliche Bewegung von einem Ende zum andern besitzt, auch nach Erfordern grösser oder geringer gestalten. Du Moncel zeigte zuerst, wie solche Curven zu berechnen sind; die Hebel von Robert Houdin sind empirisch gekrümmt. Mechanische Gelenke können mehr oder weniger vollkommen

Digitized by Google

zu demselben Zwecke angewendet werden. Die Figur 129 zeigt eine mechanische Art des Abgleiches, wie sie von Froment erfunden und von Roux benutzt wurde. Der Hebel von Stanhope ist bekannt; sein Zweck besteht darin, eine schwache Kraft für grossen Bereich in eine stärkere Kraft bei kurzem Bereich umzuformen. Hier macht man es umgekehrt. Der mit starker Kraft in kurzem Bereich angezogene Hebel wird mit dem unteren Ende eines Hebels von Stanhope verbunden; der am Knie des Hebels befindliche Arm ergibt eine Kraft, die sich über einen ganz verschiedenen Bereich vertheilt.

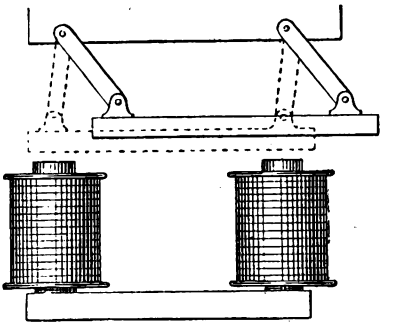


Fig. 130.

In einer anderen von Froment herrührenden Einrichtung kann der Anker sich in Folge der Befestigung an zwei beweglichen Armen parallel zu sich selbst nach seitwärts bewegen. (Fig. 130). Die Anziehungsbewegung nach den Polen hin wird so in eine seitliche Bewegung von ausgedehnter und mehr gleichförmiger Art verwandelt. In der Bogenlampe von Serrin wird eine Bewegung in seitlicher Annäherung verwendet, denn der Anker des Elektromagnetes darf nicht gerade zu den Polen des Magnetes hin gehen, sondern wird schräge an ihnen vorbei getrieben.

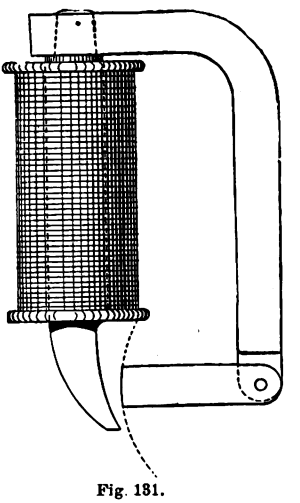


Fig. 131.

Bei der beschriebenen Einrichtung wird der magnetische Kreis durch die Annäherung an die Pole verbessert; der durch das Gelenk der Bewegung des Ankers auferlegte Zwang gibt aber Veranlassung, dass die Verbesserung mehr allmählich eintritt, als wenn die Annäherungsbewegung unmittelbar erfolgt. Denselben Zweck kann man in verschiedener Weise erreichen. Es ist z. B. durch Gestaltung der Polflächen oder durch Zufügung von Polschuhen besonderer Form möglich, eine Annäherung des Ankers so herbeizuführen, dass dadurch der magnetische Kreis ganz allmählich verbessert wird. Eine solche Einrichtung ist in Figur 131

Digitized by Google

dargestellt; sie besteht darin, den Anker an einem Pol des Elektromagnetes drehbar zu lagern, während der andere Pol mit einem gekrümmten Polschuh versehen wird. Durch Veränderung der Form des Letzteren kann man jede gewünschte Änderung in der Vertheilung des Zuges an verschiedenen Punkten der Bewegung schaffen. Wenn in diesem besonderen Falle der Anker als Ganzes sich nähert, so vergrössert er doch seine Entfernung von dem gekrümmten Polschuh. Ein diesem ähnlicher Magnet wird in der Lampe von Paterson und Cooper's Phoenix-Lampe angewendet

Eine andere Einrichtung für schräge Annäherung wurde von Froment angegeben. In einen V förmigen Zwischenraum in dem Kreise des Magnetes ist eine Art eisernen Keils eingesetzt, der nicht entsprechend jeder Fläche angezogen wird, sondern zwischen Führungen seitlich hineingelangt.

Alle diese Einrichtungen können als magnetische gleichwerthige Formen gut bekannter mechanischer Einrichtungen, die auf dem Principe des Keils und Daumens beruhen, angesehen werden.

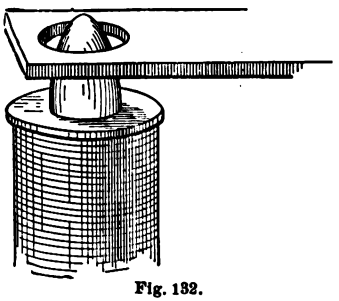


Fig. 132.

Eine andere Art, den Zug abzugleichen, wurde von Wheatstone bei seinem Telegraphen im Jahre 1839 verwendet. In den Anker ist ein Loch gebohrt, das Ende des Kerns ist zu einem vorspringenden Kegel ausgebildet, der durch die Öffnung des Ankers greift, wodurch eine gleichmässigere Kraft und ein grösserer Bereich gesichert wird. Dieselbe in Figur 132 dargestellte Einrichtung ist in neuerer Zeit wieder in der Form des Elektromagnetes aufgetaucht, wie er in der Bogenlampe von Thomson-Houston und dem automatischen Regulator dieser Firma verwendet wird. Hjörth hat im Jahre 1854 für einen seiner elektrischen Motoren eine ähnliche Einrichtung verwendet; der Anker hat die Form einer konischen Tasse, die auf einen konischen Pol passt.

IV. Elektromagnetische Daumen.

Wie schon bemerkt, besitzen die Einrichtungen, die auf seitlicher Annäherung des Ankers an eine Polfläche beruhen, eine Ähnlichkeit mit der Vorrichtung des Daumens, der selbst eine Art der schiefen Ebene bildet. Eine umgekehrte Art elektro-

Digitized by Google

magnetischen Daumens, (ursprünglich von Wheatstone angegeben) findet in kleinen magnetischen Maschinen häufig Anwendung. Die Figur 133 stellt eine solche Form dar, bei der ein so auf einem Zapfen ruhender Anker, dass er sich um seine Mitte drehen kann, von einem eisernen Ringe umgeben ist, durch den die Kraftlinien vom Nord- zum Südpole zurückströmen. Die innere Fläche des Ringes ist schief ausgeschnitten. Wenden wir unseren Grundsatz an, dass der magnetische Stromkreis sich so viel als möglich zu verbessern sucht, so ist klar, dass der Elektromagnet sich soweit drehen wird, bis die Lücken zwischen Anker und Ring auf ein Minimum zurückgeführt worden sind.

Wenn dann der Strom unterbrochen wird, so geht der Elektromagnet über die todten Punkte hinweg, und kann wieder (selbstthätig) in den Stromkreis geschaltet werden, um von Neuem der Anziehung zu unterliegen und so fort. Es besteht somit eine Ähnlichkeit zwischen dieser Maschine und einer Windmühle, deren schräge Flügel, die als geneigte Ebene wirken, rund herum quer zur Richtung der Windkraft getrieben werden.

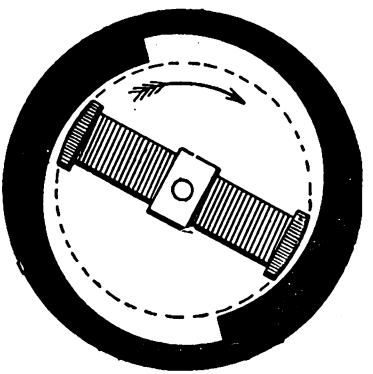


Fig. 133.

Alle elektromagnetischen Einrichtungen, die dazu dienen, den Zug eines Elektromagnetes zu vertheilen, mögen sie darauf beruhen, dass Polschuhe oder Anker besonders geformt werden, oder darauf, dass Anker oder Elektromagnete zu bestimmten Bewegungen gezwungen oder drehbar angeordnet werden, können nach den beschriebenen Methoden in magnetischer Hinsicht als Daumen, Keile oder geneigte Ebenen betrachtet werden.

V. Elektromagnetische Gelenke.

In gleicher Weise wie ein Gelenk durch Verbindung verschiedener mechanischer Einzeltheile, wie Hebel, Kurbelstangen u. s. w., mittels Verbindungsstangen und Verbindungsbolzen hergestellt wird, kann man auch Verbindungen von zwei oder mehr Elektromagneten als ein elektromagnetisches Gelenk ansehen. In manchen Fällen können Elektromagnete oder ihre Anker wirklich durch Verbindungsstücke vereinigt werden, in anderen kann die Verbindung nur durch gegenseitige Anziehung über einen Zwischen-

Digitized by Google

raum hinweg oder durch gleichzeitige Anziehung eines gemeinschaftlichen Ankers bewirkt werden.

Der einfachste Fall ist in der Figur 134 dargestellt. Hier hängen zwei Elektromagnete an einem Ende durch ein Gelenk zusammen, und ziehen sich an oder stossen sich ab, je nach der Richtung der durch die Spule fliessenden Ströme. Eine Einrichtung dieser Art wurde im Jahre 1879 von Rapieff verwendet.

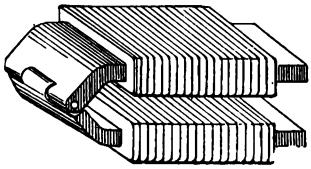


Fig. 134.

Eine andere eigenthümliche elektromagnetische Vorrichtung besteht in der Verbindung zweier Elektromagnete unter rechtem Winkel. Diese Einrichtung eignet sich zur Herstellung einer Schliessvorrichtung, die man nach Belieben öffnen und schliessen will; sie ist für gewisse Formen elektromagnetischer Schlösser verwendet worden. Auch bei dem automatischen Eisenbahn-Blocksystem von Tyer und dem von Professor Ayrton und Perry wird diese Form benutzt[1]). Ein Beispiel, das dem Apparat von Du Moncel[2]) entnommen ist, der mit Hülfe der Elektricität die auf dem Tastenwerk einer Orgel oder eines Klavieres gespielten Noten verzeichnen sollte, wird zweckentsprechend sein.

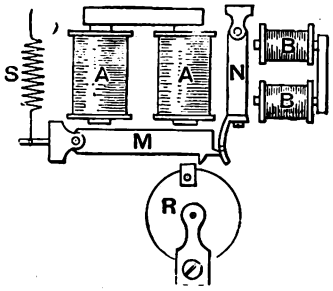


Fig. 135.

Das Elektromagnetsystem hat die Aufgabe, die Bewegung einer umlaufenden Achse anzuhalten, oder die Wiederaufnahme der Bewegung zuzulassen; jede dieser Wirkungen soll durch einfachen elektrischen Stromstoss erreicht werden. In Figur 135 stellt *R* eine mit einem hervorragenden Zahne versehene Scheibe an der umlaufenden Welle dar. Die Scheibe wird durch einen Vorsprung am Anker *M* des Elektromagnetes *A A* angehalten. Wenn ein Strom um den Elektromagnet gesendet wird, zieht letzerer den Anker an und lässt die umlaufende Welle frei; zu derselben Zeit, in der der Anker *M* aus seiner Lage kommt, klinkt eine an

1) Vergl. den hübsch illustrirten Artikel in La Lumière Electrique Bd. XI S. 345 von 1884.

2) Du Moncel, Abhandlung über die Anwendung der Elektricität Bd. II S. 292 und Bd. III S. 117 (Ausgabe von 1857). Vergl. auch La Lumière Electrique III S. 339 1881.

Digitized by Google

seinem Ende befindliche Nase in eine Nuthe des Ankers *N* eines zweiten Elektromagnetes *B* ein. Wenn die Drehung gehemmt werden soll, muss ein Strom um den zweiten Elektromagnet fliessen. Dann zieht dieser *N* an und lässt *M* los, in Folge dessen die in Drehung befindliche Scheibe wieder angehalten wird. Noch eine andere Art der Verwendung zweier miteinander verbundener Elektromagnete findet man in der Einrichtung der Scheibentelegraphen von Cowper und Robertson. In Cowper's Apparat besitzen die beiden Elektromagnete besondere mechanisch verbundene Anker. Im Apparat von Robertson wirken beide auf einen gemeinsamen Anker, der sich in diagonaler Richtung dem Verhältniss der beiden Kräfte gemäss bewegt, die auf den Anker in rechtem Winkel zu einander wirken.

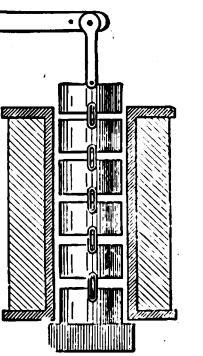


Fig. 136.

Eine weitere Art ist aus einer Einrichtung von Pellin ersichtlich, die zu dem Zwecke entworfen worden ist, der Bewegung einen grossen Spiralraum zu geben. Ein in den Elektromagnet eintauchender Kern besteht aus einer Anzahl kurzer cylindrischer Eisenstücke, die in Reihen gelenkartig mit einander verbunden sind, so dass sie bei starker Magnetisirung durch die umgebende Spule einander anziehen und so mit einem kräftigen Zug die unterste Verbindung in die Höhe ziehen. Die Absicht, die in verschiedener Weise einer Ausbildung fähig ist, erscheint sinnreich, der erwartete Erfolg jedoch fraglich. (Fig. 136).

VI. Apparate, die auf Abstossung gegründet sind.

Die in der Figur 134 erläuterte Einrichtung kann sowohl für Anziehung als Abstossung verwendet werden, es gibt aber einige Formen, die nur Abstossung hervorrufen.

In einem von Maikoff und De Kabath angegebenen Apparat gehen z. B. zwei nicht parallele und am Boden drehbar gelagerte Eisenkerne durch eine röhrenförmige Spule. Werden beide Kerne magnetisirt, so gehen sie, statt einander anzuziehen, auseinander; sie haben das Bestreben, sich in die Richtung der durch die Röhre laufenden magnetischen Linien zu stellen. Die am Boden weit aus einander stehenden Kerne suchen sich auch an der Spitze aus einander zu lagern. (Fig. 137).

Digitized by Google

Im Jahre 1850 erhielten Brown und Williams auf die in der Figur 138 dargestellte Einrichtung ein Patent. Sie besteht aus einem Elektromagnet, der einen Theil von sich selbst zurückstösst. Die Spule ist um eine hohle Röhre gewunden; innerhalb der Spule befindet sich ein kleines als Segment eines Cylinders gebogenes Eisenstück *B*, das von einem Ende der Röhre zum andern reicht. Ein anderes kleines Eisenstück *A*, auch wie das Segment einer Röhre gebogen, ist in der Achse der Spule drehbar gelagert. Wird diese magnetisirt, so sucht das eine Eisenstück vom andern sich zu entfernen, weil beide gleiche Polarität erlangen. Später sind viele Strom- und Spannungsmesser nach dieser Anordnung, Abstossung paralleler Kerne zu erzeugen, hergestellt worden.

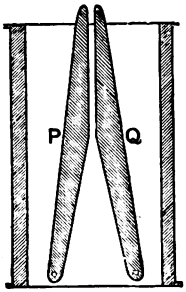


Fig. 137.

Ein anderes Beispiel elektromagnetischer Abstossung liefert der in Figur 139 abgebildete Apparat. Er besteht aus einem Elektromagnet, dessen Kern durch ein Eisenrohr von 5 *cm* Länge gebildet wird. Nichts aussergewöhnliches kann man an ihm wahrnehmen, er wird, wenn Strom durch die Wickelung fliesst, an Eisenstücken haften; in dieser Hinsicht ist der Apparat augenscheinlich ein gewöhnlicher Elektromagnet. Man nehme nun einen kleinen runden, etwa 2,5 *cm* langen Eisenstab, stecke ihn in das eine Ende der Röhre und schliesse den Strom. Der magnetische Kreis in diesem Apparat besitzt nur eine geringe Länge im Eisen, das Übrige ist Luft. Der magnetische Kreis sucht sich zu vervollständigen, jedoch nicht etwa dadurch, dass er den Weg im Eisen verkürzt, sondern dass er den Weg verlängert, indem er das Eisenstück vorwärts stösst, um so mehr Oberfläche zur Zerstreuung zu gewinnen. Beim Stromschluss springt das kurze Eisenstück heraus und fällt nieder. Der Apparat wird eine Art magnetischer Pistole. Dieser Versuch ist zweimal entdeckt worden. Ich fand ihn zuerst von Du Moncel in La Lumière Electrique unter dem Namen pistolet électromagnétique beschrieben; unabhängig davon erfand ihn Shelford Bidwell. Er erstattete der Physicalischen Gesellschaft im Jahre 1885 einen Bericht, der aber wahrscheinlich verloren ging, da er in den Akten der Gesellschaft nicht erwähnt worden ist.

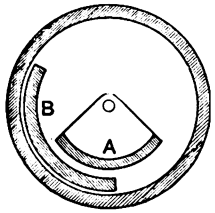


Fig. 138.

Digitized by Google

Shelford Bidwell hat noch eine andere Form angegeben, die denselben Vorgang erläutert (Fig. 140). Sie besteht aus zwei Streifen dünnen, federnden Eisenblechs, die an den Enden verbunden, aber auseinandergebogen sind. Wenn diese in eine magnetisirende Spule gesteckt werden, dehnen sie sich beim Stromschluss aus. Steckt man andererseits zwei in der Mitte verbundene, flache, getrennte Streifen in die Spule, so haben sie das Bestreben, sich am Ende zu öffnen, wenn die magnetische Kraft wirkt. Durch das Auseinandergehen können sie nämlich am besten dazu beitragen, dass die magnetischen Linien den Rückweg durch die Luft finden.

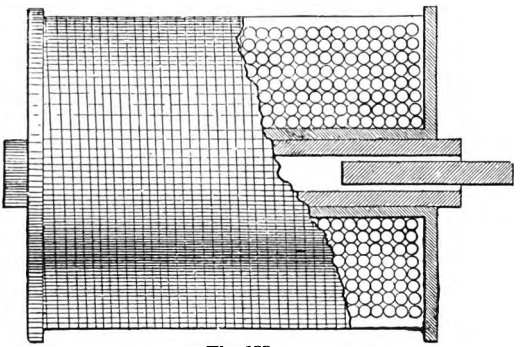


Fig. 139.

VII. Polarisirte elektromagnetische Einrichtungen.

Eine Klasse elektromagnetischer Apparate lässt einen besonderen Unterschied erkennen und zwar diejenige, bei der als Elektromagnet ein Dauermagnet verwendet wird. Eine solche Anordnung bezeichnet man als polarisirten Apparat Der Zweck des Dauermagnetes erscheint in verschiedenen Fällen ganz abweichend. Ob eine klare Unterscheidung zwischen drei völlig gesonderten Zwecken bei Verwendung eines Dauermagnetes in Verbindung mit einem Elektromagneten jemals festgestellt worden, erscheint mir nicht sicher. Der erste Zweck besteht darin, die einheitliche Richtung der Bewegung zu sichern, der zweite darin, die Geschwindigkeit der Wirkung und die Empfindlichkeit für schwache Ströme zu erhöhen, der dritte darin, die mechanische Wirkung des Stromes zu verstärken.

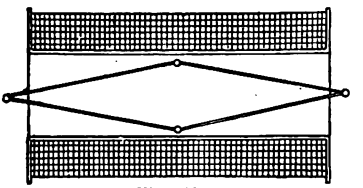


Fig. 140.

a. Einheitliche Richtung der Bewegung — Bei einem gewöhnlichen Elektromagnet hat die Richtung des Stromes keine Bedeutung; es ist gleich, ob ein Nordpol oder ein Südpol erzeugt wird, der Anker wird angezogen; bei der Umkehrung des Stromes wird der

Digitized by Google

Anker auch angezogen. Ein alter Versuch von Sturgeon und Henry zeigt, dass, wenn man in den Umwindungen eines Elektromagnetes mit einem schweren anhängenden Gewicht, den Strom plötzlich umkehrt, er ungeachtet der Umkehrung des Magnetismus das Gewicht festhält. Das Gewicht findet keine Zeit zum Abfall, bevor der Magnet wieder mit magnetischen Linien in anderer Richtung durchsetzt ist. Welchen Weg der Magnetismus im gewöhnlichen Elektromagnet aus weichem Eisen auch nimmt, der Anker wird angezogen. Wenn der Anker aber selbst ein Dauermagnet von Stahl ist, wird er angezogen oder abgestossen, je nachdem die Pole ungleichnamig oder gleichnamig sind, d. h. durch den Gebrauch eines polarisirten Ankers kann man eine einheitliche Richtung der Bewegung in Übereinstimmung mit dem Strome sicher stellen.

Ein Rückblick auf Figur 20 zeigt, dass in einer Vorrichtung, die einen festen Dauermagnet und einen beweglichen, stromführenden Leiter enthält, die Richtung der Bewegung von der Richtung des Stromes abhängt. Bei Umkehrung des Stromes wird auch die Richtung der Bewegung umgekehrt. Dies weicht aber von der Wirkung eines gewöhnlichen Elektromagnetes aus weichem Eisen ab, denn bei diesem wirkt der Kern auf den Anker in der gleichen Richtung anziehend, gleichviel, in welcher Richtung der Strom in den Spulen fliesst. Zur Unterscheidung der beiden Fälle nennt man die Einrichtungen, bei denen ein Dauermagnet verwendet wird, polarisirte Apparate, die gewöhnlichen Elektromagnete dagegen nicht polarisirte Apparate. Die einfachwirkende Vorrichtung wird demnach zu einer doppeltwirkenden.

Eine unmittelbare Anwendung dieser Thatsache für telegraphische Zwecke findet man in dem Doppelsprechen. Man kann zwei Telegramme zu gleicher Zeit und in gleicher Richtung zu zwei verschiedenen Apparatsystemen senden; das eine System besitzt gewöhnliche Elektromagnete mit einer Feder am Anker aus weichem Eisen, das unabhängig von der Richtung des Stromes wirkt, und dessen Wirkung nur von der Stromstärke und deren Dauer abhängt; das andere System mit polarisirtem Anker kommt nicht je nach der Stromstärke, sondern je nach der Richtung des Stromes in Gang. Dementsprechend können zwei verschiedene Sätze Telegramme auf einer Linie in derselben Richtung und Zeit abgelassen werden.

Eine andere Art zur Herstellung einer polarisirten Einrichtung besteht darin, die Kerne des Elektromagnetes an einem Stahl-

Digitized by Google

magnet zu befestigen, der ihnen eine anfängliche Magnetisirung mittheilt. Solche Elektromagnete wurden von Brett im Jahre 1848 und von Hjörth im Jahre 1850 benutzt. Ein Patent für eine ähnliche Vorrichtung wurde von Sir William Thomson im Jahre 1870 nachgesucht, aber vom Patentamte verweigert. Im Jahre 1871 nahm S. A. Varley ein Patent auf einen Elektromagnet mit einem Kern aus Stahldrähten, deren Enden verbunden waren.

Es wurde vorhin erwähnt, dass ein polarisirter Anker von einem Elektromagnet je nach der Richtung des Stromes entweder angezogen oder abgestossen wird. Dies trifft nur bei der Annahme zu, dass der Anker parallel zu der die Pole des Elektromagnetes verbindenden Linie sich befindet. Der polarisirte Anker kann aber quer zwischen die Pole gebracht werden. Sturgeon war ebenfalls der Erfinder eines polarisirten Apparates, der als elektromagnetischer Telegraph verwendet werden sollte. Die Figur 141 zeigt den Apparat. Er besteht aus einer dauernd magnetisirten stählernen Compassnadel, die mit einem Pole zwischen den Polen eines Hufeisenmagnetes aus weichem Eisen sich befindet. Fliesst der Strom in den Spulen von *N* nach *S*, so wird der linke ein Nordpol, der rechte ein Südpol, mithin dreht sich der Nordpol der Compassnadel nach rechts. Bei Umkehrung des Stromes wird sich die Nadel nach links bewegen. Diese Erfindung, die Sturgeon im Jahre 1836, ohne ein Patent zu nehmen, veröffentlichte, ist nie in den technischen Gebrauch gelangt, obwohl zu jener Zeit die Telegraphie ein Monopol in der Hand weniger betheiligter Personen war.

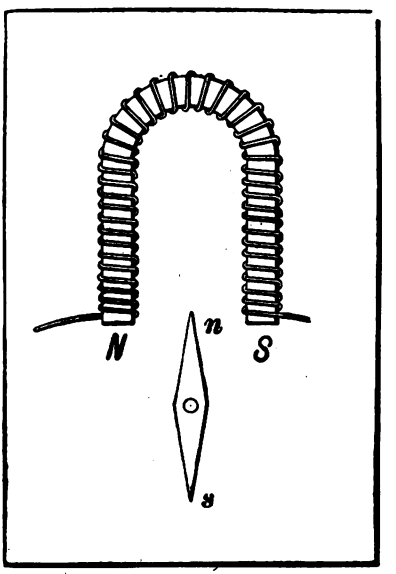


Fig. 141.

Wheatstone nahm im Jahre 1845 ein Patent auf die Verwendung einer dauernd magnetisirten Nadel, die nach der einen oder andern Richtung zwischen den Polen eines Elektromagnetes angezogen werden sollte. Sturgeon beschrieb dieselbe

Digitized by Google

Einrichtung in den Annalen der Elektricität im Jahre 1840. Glösener erhebt den Anspruch, den Ersatz einfacher Anker durch Dauermagnete im Jahre 1842 erfunden zu haben. Beim Gebrauch polarisirter Apparate kann man natürlich nicht mit einem einfachen Strome arbeiten, der geöffnet und geschlossen wird, sondern mit Wechselströmen. Ein in bestimmter Richtung gesendeter Strom wird den beweglichen Theil in einer Richtung bewegen, bei der Umkehrung des Stromes wird der Theil nach der andern Seite übergehen.

Wenn nach Angabe von Du Moncel[1]) ein Elektromagnet aus weichem Eisen auf einen parallel zur Verbindungslinie der Pole angebrachten Dauermagnet als polarisirter Anker wirkt, so ist die Kraft, mit der der Anker abgestossen wird, wenn der Strom in bestimmter Richtung in den Spulen fliesst, nicht gleich der Kraft, mit der der Anker angezogen wird, wenn der Strom in entgegengesetzter Richtung fliesst. Die Abstossungskraft ist bei gleichen Entfernungen immer geringer als die Anziehungskraft. Dies wird natürlich durch die grössere magnetische Strömung im letzteren Falle bedingt.

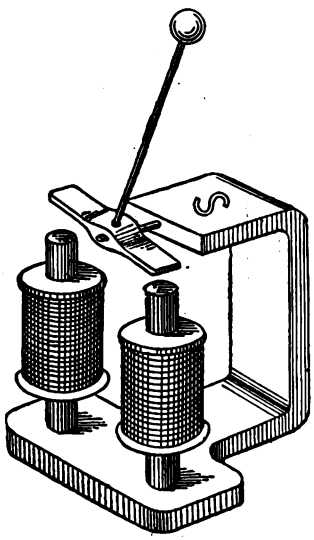


Fig. 142.

Bei einer Klasse von Weckern — die mit Wechselströmen arbeiten sollen — werden polarisirte Vorrichtungen verwendet. Bei einer der in Figur 142 dargestellten Form sind die beiden den Elektromagnet bildenden Kerne aus weichem Eisen dadurch polarisirt, dass sie an einem gebogenen stählernen Dauermagnet befestigt sind. Wenn das gebogene Ende des Magnetes den Südpol bildet, so sind die oberen Enden beider Kerne Nordpole. Beide ziehen die Enden des drehbaren Eisens an; der Anker bleibt in irgend einer Lage geneigt liegen. Sendet man durch die Spulen einen Strom in gewöhnlicher Weise, der im entgegengesetzten Sinne in den beiden Spulen fliesst, so wird er die Strömung magnetischer Kraftlinien in einer Spule verstärken und in der andern schwächen.

1) La Lumière Electique Bd. II S. 109.

Digitized by Google

Die Umkehrung des Stromes wird folglich bewirken, dass der drehbare Anker seine Lage auch umkehrt. Bei diesen Weckern braucht man keine Batterie, sondern nur eine kleine durch eine Kurbel zu bewegende Wechselstrommaschine. Die Wechselströme bewirken, dass der Anker abwechselnd rechts und links schwingt und den an ihm befestigten Klöppel zwischen zwei Glocken hin und her bewegt.

Eine andere Form des polarisirten Weckers, die von M. Abdank angegeben wurde, ist in Figur 143 dargestellt.

Hier wird ein Hufeisenmagnet aus Stahl benutzt, um Anfangsmagnetismus zu erzeugen; Wechselströme müssen einem kurzen Eisenkern, der in der Spule und zwischen den Schenkeln des Magnetes liegt, wechselnden Magnetismus ertheilen.

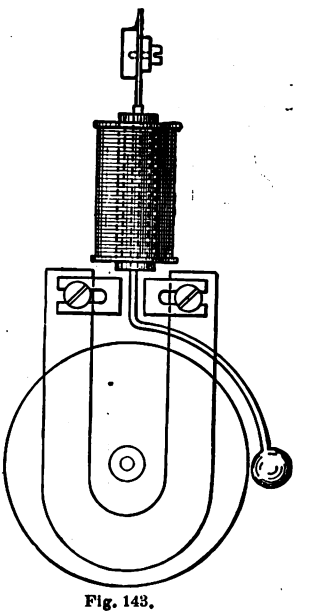


Fig. 143.

Die Verwendung eines stählernen Dauermagnetes, der in eine röhrenförmige Spule eintaucht, liefert ein weiteres Beispiel. Der Magnet wird je nach Richtung des erregenden Stromes hineingezogen oder ausgestossen. Eine ähnliche Vorrichtung in grösserem Masstabe, wie die des Siemens'schen Relais wird in einer von Hipp's elektrischen Uhren benutzt, um die Hemmung zu treiben.

b. Geschwindigkeit und Empfindlichkeit der Wirkung — Zu Übertragungszwecken werden häufig polarisirte Relais verwendet. Bei der Normalform des in der Britischen Telegraphen Verwaltung verwendeten Relais theilt ein Stahlmagnet einer kleinen Zunge oder einem Anker, der sich zwischen den Polen eines Elektromagnetes bewegt, dauernden Magnetismus mit. Der Elektromagnet empfängt die Zeichen. In diesem Falle arbeitet die Zunge des polarisirten Relais zwischen zwei Anschlägen; der Bewegungsbereich ist sehr klein, damit der Apparat auf schwache Ströme anspricht. Auf den ersten Blick ist es nicht recht klar, aus welchem Grunde der Dauermagnet einen Apparat empfindlicher machen kann. Wie kann Dauermagnetismus die Geschwindigkeit des Arbeitens sicher stellen? Man sollte meinen, dass Dauermagnetismus ein Zustand ist, der in den Kernen der

Digitized by Google

arbeitenden Elektromagnete vermieden werden müsste, weil sonst die Anker an den Polen kleben, nachdem sie einmal angezogen sind. Zurückbleibender Magnetismus würde freilich das Arbeiten hindern, falls man die Einrichtungen nicht derart trifft, dass er nutzbringend wirkt. Vor Jahren nahm man an, dass Dauermagnetismus keine Hülfsquelle sei, er wurde als unvermeidliches Übel angesehen, dessen man sich mit allen Mitteln entledigen müsse, bis im Jahre 1855 Hughes zeigte, wie vortheilhaft es sei, Dauermagnetismus in den Kernen eines Elektromagnetes zu besitzen. Die Form des Elektromagnetes von Hughes, auf den bereits auf S. 164 hingewiesen worden ist, zeigt die Figur 144.

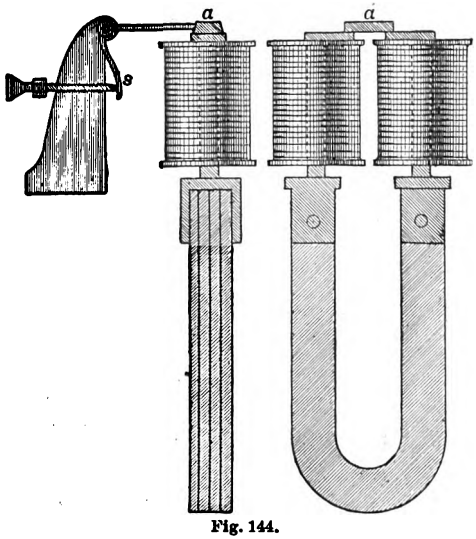


Fig. 144.

Ein kräftiger Dauermagnet in Hufeisenform trägt auf seinen Polschuhen Spulen; ein kurzer Anker an der Spitze ist mit einem drehbar gelagerten Hebel und einer Gegenfeder verbunden. Die Feder sucht den Anker abzureissen, aber der Dauermagnet besitzt eben noch Kraft genug, den Anker festzuhalten. Durch Drehung einer kleinen Schraube hinter der Feder lassen sich die beiden entgegengesetzten Kräfte abgleichen, so dass sie beinahe im Gleichgewicht sich befinden, dass also der Anker nach oben durch den Magnetismus gehalten wird und die Feder nicht im Stande ist, ihn abzureissen. Wenn bei solcher Begrenzung der Wirkungen ein Strom in bestimmter Richtung durch die Spule fliesst, so schwächt er den Magnetismus hinreichend, um die Wirkung der Feder überwiegen zu lassen; der Anker fällt dann ab. Der Druckapparat arbeitet dann durch Freilassen des Ankers sobald das Gleichgewicht durch den elektrischen Strom gestört wird; er spricht auf sehr schwache Ströme an. Der Anker muss mechanisch wieder angelegt werden; dies geschieht zwischen je zwei Zeichen. Die Anordnung ist als eine scharfsinnige Art electromagnetischer Vorrichtungen zu bezeichnen.

Digitized by Google

Einrichtungen, mittels deren sehr schwache Ströme eine beträchtliche mechanische Wirkung vollführen, können als elektromagnetische Hemmungen bezeichnet werden.

c. Erhöhung der mechanischen Wirkung des Stromes. — Der dritte Zweck eines Dauermagnetes, eine grössere mechanische Wirkung des veränderlichen Stromes sicher zu stellen, ist enge mit dem vorhin besprochenen Zwecke, Empfindlichkeit herbeizuführen, verbunden. In dieser Absicht wird der Dauermagnet in Fernsprech-Empfangsapparaten benutzt; er verstärkt die mechanische Wirkung des Stromes und macht den Empfangsapparat zugleich empfindlicher. Zur Klarstellung dessen machte ich Versuche in der Richtung, in wie weit dies von irgend einer Änderung der magnetischen Durchlässigkeit des Eisens bei verschiedenen Graden der Magnetisirung abhänge, denn ich fand, dass damit ein Zusammenhang bestehe, obgleich damit die Sache nicht vollständig zu erklären war. Prof. George Forbes gab mir den Schlüssel für die richtige Erklärung: es liegt in dem Gesetz der Zugkraft, dass nämlich die Zugkraft zwischen dem Magnet und seinem Anker proportional dem Quadrat der Zahl der Kraftlinien ist, die in Wirksamkeit treten. Ist N die Zahl der durch eine gegebene Fläche hindurch wirkenden magnetischen Kraftlinien, so ist die Anziehung dem Quadrat dieser Zahl proportional. Tritt eine bestimmte Zahl Kraftlinien N dauernd in den Anker, so ist die Anziehung proportional N^2. Wird der Magnetismus geändert, etwa um den Betrag dN stärker, so beträgt die Zahl der Kraftlinien nunmehr $N + dN$. Die Zugkraft ist nun gleich dem Quadrat dieser Menge. Es ist einleuchtend, dass die Bewegung proportional der Differenz zwischen der ersteren und der letzteren Zugkraft sein muss.

Vermehrte Zugkraft proportional zu $N^2 + 2NdN + dN^2$

Anfängliche Zugkraft proportional zu N^2

Der Unterschied beträgt $2N.dN + dN^2$

Das letzte Glied kann man vernachlässigen, weil es im Vergleich zum andern klein ist. Demnach ist die Änderung der Zugkraft proportional $2\,N.\,d\,N$. Die Änderung der Zugkraft zwischen dem anfänglichen Magnetismus und diesem, vermehrt um den zugefügten Magnetismus ergibt sich also nicht einfach proportional zu der Änderung (dN) des Magnetismus, sondern auch zu der anfänglichen Zahl N der durchtretenden Kraftlinien. Je kräftiger die Zugkraft zu Anfang ist, um so grösser wird die Änderung

Digitized by Google

der Zugkraft sein, wenn eine kleine Änderung in der Zahl der Kraftlinien erzeugt wird. Daher stammen die grössere Empfindlichkeit der Wirkung bei dem Elektromagnet von Hughes und grössere mechanische Leistungen als Ergebniss der Verwendung von Dauermagnetismus bei den Elektromagneten der Fernsprech-Empfangsapparate.

Bewegliche Spule im dauernd magnetischen Felde.

Den schlagendsten Beweis, wie durch Verwendung eines Dauermagnetes die Wirkung eines schwachen Stromes verstärkt werden kann, liefert noch ein anderer Apparat. Eine von einem Strome durchflossene Spule unterliegt mechanischen Kräften, wenn sie in einem magnetischen Felde liegt; die Kraft ist dabei der Feldstärke proportional. Wenn man daher dem magnetischen Felde durch Verwendung kräftiger Magnete eine grosse Stärke gibt, lassen sich die Wirkungen äusserst geringfügiger Ströme nachweisen. Im Jahre 1835 erfand Sturgeon ein Thermogalvanometer nach diesem Princip, indem er den Stromkreis, der die thermoelektrischen Verbindungen enthielt, im Felde eines mächtigen Stahlmagnetes aufhängte. Bain benutzte diese Einrichtung bei einigen seiner telegraphischen Erfindungen im Jahre 1841. (Figur 145).

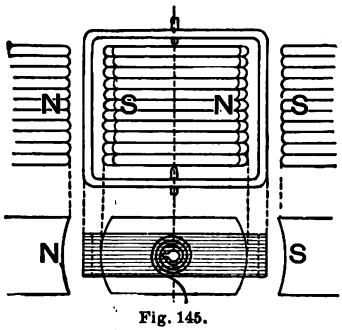


Fig. 145.

Die Einrichtung des Heberschreibapparates (Siphon Recorder) von Sir W. Thomson beruht auf diesem Princip und ist ein wohlbekanntes Beispiel hierfür. Auch solche Galvanometer, deren wesentlicher Theil eine bewegliche, zwischen den Polen eines Dauermagnetes aufgehängte Spule ausmacht, liefern Beispiele. Von diesen Galvanometern ist das von Robertson (vgl. Encyclopaedia Britannica Bd. VIII 1855) das älteste Beispiel, ein neueres das von Maxwell angegebene, später von d'Arsonval praktisch ausgeführte. Siemens hat ein Relais in ähnlicher Weise hergestellt. Das Radio-Micrometer von Vernon Boys beruht auf derselben Grundlage.

Eine Einrichtung mit beweglichen Spulen zum Gebrauch in Bogenlampen wurde von Dubrava angegeben. Auf einem Eisen-

Digitized by Google

rahmen (Fig. 146) sind zwei feste Spulen AA so mit dem Stromkreise verbunden, dass sie beständig Nordpole NN in der Mitte des innern Stabes und Südpole SS als Folgepole in der Mitte der äusseren Stäbe hervorrufen. Zwischen den äussern und innern Stäben entstehen deshalb starke magnetische Felder. Zwei andere Spulen BB können sich auf den äusseren Stäben gleitend bewegen. Werden Ströme durch die Spulen BB geleitet, so werden sie von Kräften angegriffen, die in rechtem Winkel zum Strom und zu den magnetischen Kraftlinien wirken, und die Spulen je nach der Stromrichtung aufwärts oder abwärts zu bewegen streben.

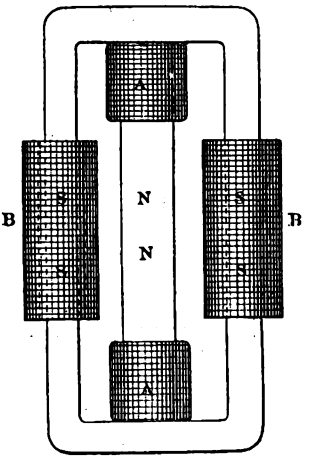


Fig. 146.

Unter den polarisirten Apparaten ist besonders der gewöhnliche Fernsprech-Empfangsapparat zu erwähnen. Dieser besteht in der ihm von Graham Bell gegebenen Form aus einem Elektromagnet nach Hughes (d. h. aus einem stählernen Dauermagnet, an dessen Enden Polschuhe aus weichem Eisen, umgeben von einer Spule, sich befinden) mit einer dünnen kreisrunden Eisenplatte als schwingendem Anker. In Bells ursprünglicher Form besass der Elektromagnet Hufeisenform, beide Pole standen der Eisenplatte gegenüber. Die gewöhnlichere Form mit einem centralen Pol wurde später verwendet; sie ist weniger wirksam, obwohl handlicher. Zwei neuere Abänderungen sind der Erwähnung werth. In der Form von d'Arsonval (Figur 147) ist der Dauermagnet so gekrümmt, dass ein ringförmiger Polschuh um den Centralpol gelegt werden kann. In Aders Form (Figur 148) befindet sich eine Eisenmasse an der andern Seite der dünnen Eisenplatte den Polen gegenüber. Die Gegenwart dieser Eisenmasse bewirkt, dass

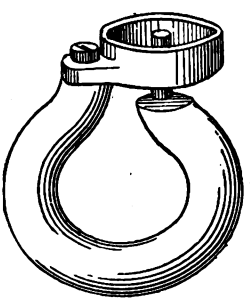


Fig. 147.

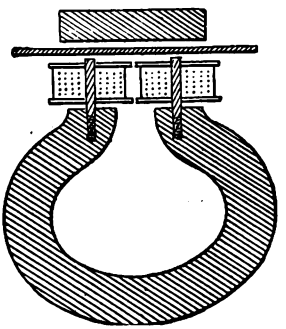


Fig. 148.

Digitized by Google

die Platte kräftiger durch den Magnet angezogen wird; sie verbessert den magnetischen Kreis als Ganzes und concentrirt das magnetische Feld jenseits der Enden der beiden Polverlängerungen.

VIII. Elektromagnotische Apparate mit schwingenden Theilen.

Diese bilden eine Klasse von Apparaten einer solchen Bedeutung, dass sie gesondert im Kapitel X behandelt werden.

IX. Elektromagnetische Apparate mit umlaufenden Theilen.

Zur Hervorbringung einer umlaufenden Bewegung mit Hülfe eines Elektromagnetes sind viele Vorschläge abgegeben worden. Bei einigen Apparaten wird ein auf einem Zapfen drehbarer Theil

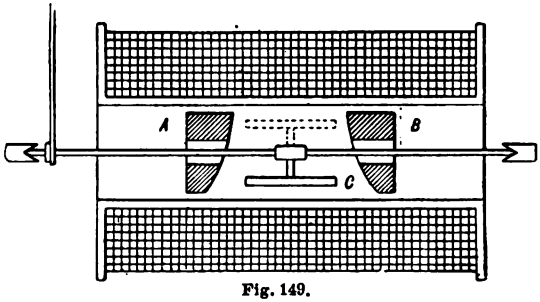


Fig. 149.

um einen Winkel von mehr oder weniger erheblicher Grösse seitwärts bewegt, bei andern wird ein fortgesetzter Umlauf erzeugt. Das älteste Beispiel der ersten Art ist die Ablenkung einer Compassnadel durch einen über oder unter ihr vorbeigeführten Strom, deren Entdeckung (im Jahre 1819) Oersted zukommt. Die einfachen früheren elektromagnetischen Maschinen von Ritchie und Andern, über die im Kapitel XII mehr angegeben wird, erläutert die zweite Art.

Drehbare Vorrichtungen, die keinen fortgesetzten Umlauf hervorbringen sollen, sind in mannigfachen Formen vorhanden, die untereinander geringe Ähnlichkeit besitzen, aber alle darin übereinstimmen, eine solche Bewegung zu schaffen, dass der magnetische Stromkreis besser, oder sein Magnetismus stärker wird. Verschiedene unter ihnen sind schon beschrieben worden einschliesslich der Apparate von Wheatstone (Fig. 133) und von Bain (Fig. 145).

Bei einem von Evershed angegebenen Strommesser wird ein kleines, auf einer Achse drehbares Eisenstück *C* parallel zu sich zwischen den gekrümmten Eisenstücken *A* und *B* herum gedreht

Digitized by Google

(Fig. 149). Die Theile sind in einer röhrenförmigen Spule aus Kupferdraht eingeschlossen.

Eine andere Ausführung derselben Idee ist in der Figur 150 dargestellt. Ein eigenthümlich geformtes eisernes Mittelstück *R* mit zwei keilartigen Nasen wird zwischen die Pole *P* und *Q* eines Elektromagnetes gebracht. Dieses Mittelstück sucht sich so zu drehen, dass eine möglichst grosse Eisenmasse in die gerade Linie zwischen die Pole gebracht wird. Einer der neuesten Vorschläge

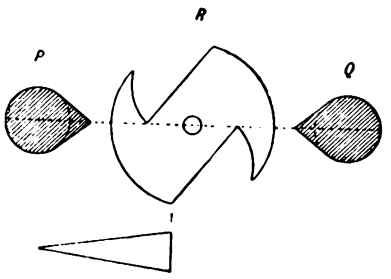


Fig. 150.

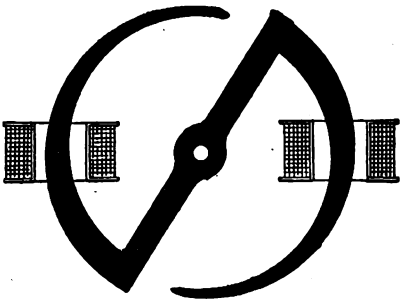


Fig. 151.

zur Hervorbringung einer Umlaufsbewegung ist in der Figur 151 abgebildet. Die beiden Magnetisirungsspulen besitzen jede eine Öffnung in der Mitte. Die eisernen konischen Kerne sind so mit einander verbunden, dass sie Theile eines Radkranzes bilden. Sie suchen so tief als möglich in die Spule einzutauchen. Diese Form hat den Zweck, von der Eigenschaft kegelförmiger eintauchender Magnete Nutzen zu ziehen (vgl. Seite 228).

Ausser den bereits erwähnten Einrichtungen gibt es noch mehrere, wo die Bewegung um oder über der Achse hervorgerufen wird. Einige von ihnen sind für telegraphische Zwecke bestimmt. In der Figur 152 ist z. B. die von Siemens vor

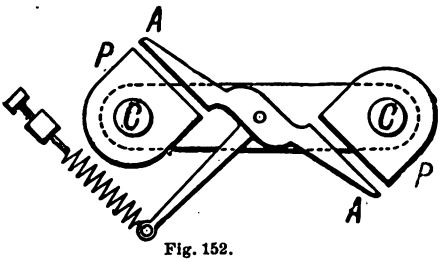


Fig. 152.

40 Jahren benutzte Methode, einen Anker *AA* drehbar zwischen den beiden Polen *PP* anzubringen, abgebildet. Die Polstücke sind an den Enden des hufeisenförmigen Magnetes *CC* befestigt. Die gewählte Form belässt nur einen geringen Zwischenraum im magnetischen Kreise, dessen Magnetisirung in Folge dessen nur einen schwachen Strom erfordert, so dass die Einrichtung sehr empfindlich ist. Hiermit möge man einen Apparat von Waterhouse (Fig. 153) vergleichen,

Digitized by Google

in dem einer der beiden cylindrischen Kerne *A* des Elektromagnetes drehbar ist und einen Ansatz im rechten Winkel trägt. Der andere Kern *B* trägt einen Ansatz *D* aus Messing oder einem andern nicht magnetischen Metall, er bildet das Lager für die Führung des Kernes *A*. Ist *A* nach auswärts gedreht, so sucht der magnetisirende Strom den Kern so zu drehen, dass der Ansatz von *A* nach dem Kern *B* zu gerichtet wird.

Alle erwähnten Einrichtungen sind nicht polarisirt; bei manchen andern ist indessen der bewegliche oder feste Theil selbst unabhängig magnetisirt. Viele veraltete Formen von Telegraphen-Relais liefern Beispiele drehbarer polarisirter Vorrichtungen. Im Relais von Varley waren z. B. zwei kleine hufeisenförmige Stahlmagnete drehbar so angebracht, dass sie in einem kleinen Winkel schwingend sich bewegten; der eine oder der andere ihrer Pole wurde dadurch gegen die Pole eines in der Mitte befindlichen geraden Elektromagnetes bewegt. Soll voller Nutzen aus der durch Hülfsmagnete erzeugten Empfindlichkeit gezogen werden, so müssen sie gross und kräftig sein. Daher ist es nicht rathsam, den Magnet selbst zu einem beweglichen Theil eines Relais zu machen, denn sonst kann es nicht schnell auf die Zeichen ansprechen.

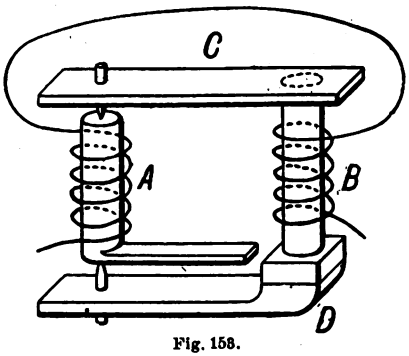


Fig. 158.

In neueren Relais ist der bewegliche Theil leicht und wird nur durch feststehende dauernde Hülfsmagnete polarisirt (in bestimmter Richtung magnetisirt).

Einige weitere Beispiele umlaufender Vorrichtungen findet man im Kapitel XII.

X. Elektromagnetische Zahngetriebe.

Magnetische Hemmung.

Eine neue von Elisha Gray herrührende und in seinem „Telautograph“ verwendete Einrichtung ist eine magnetische Hemmung. Es ist wohl bekannt, dass die umlaufende Bewegung eines Zahnrades in die schnell schwingende Bewegung eines mit Ansätzen versehenen Hebels umgewandelt werden kann. Eine jener Einrichtung ähnliche magnetische Anordnung ist in Figur 154

Digitized by Google

abgebildet; hier lässt man ein eisernes Rad auf einen eisernen Hebel mit Ansätzen einwirken, beide Theile werden durch einen Magnet so polarisirt, dass sie einander anziehen. Der Bogen, der von den Ansätzen des Hebels gebildet wird, ist so gross, dass, wenn der eine Ansatz einem Zahne gegenübersteht, der andere vor der Lücke zwischen zwei Zähnen liegt. Ansätze und Zähne können sich nicht berühren, da die Bewegung durch Anschlagpunkte begrenzt wird. In dem Apparat von Gray wird die Einrichtung benutzt, eine Zahl aufeinander folgender Contakte (durch die gegen eine Platinspitze schlagende Zunge) im genauen Verhältniss zu dem Winkel herzustellen, um den das Rad sich dreht.

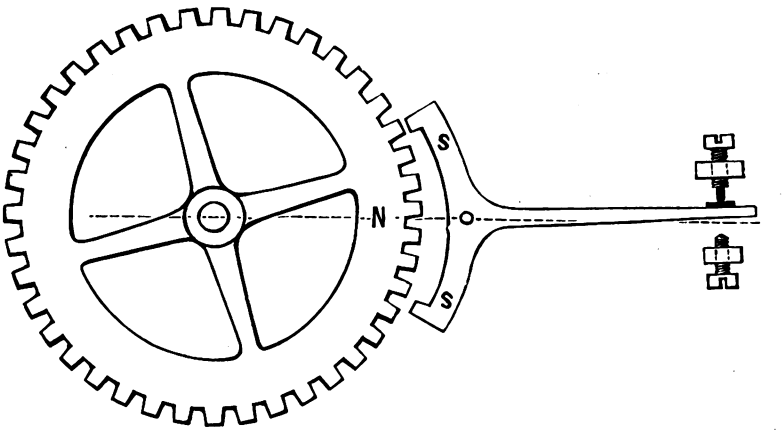


Fig. 154.

Der Verfasser hat eine ähnliche Einrichtung entworfen, um eine Normaluhr mit einem vollständig getrennten Pendel herzustellen.

Zu den Zahngetrieben ohne Contact zwischen den Zähnen gehört die elektromagnetische Kuppelung von Willans (siehe Figur 163).

Magnetische Nebenschliessungen.

Eine zweckmässige elektromagnetische Einrichtung liegt in der Verwendung eines magnetischen Nebenschlusses, d. h. einer Masse oder eines Stückes Eisen, das einen Nebenweg für die magnetischen Kraftlinien des Kreises bildet. Wir finden hierfür ein Beispiel in dem stellbaren eisernen Anker, der für kleine medicinische magnetelektrische Maschinen zur Herabminderung der Stärke häufig verwendet wird. Wird dieser Eisenanker quer

Digitized by Google

vor die Pole des Stahlmagnetes gelegt, so bildet er einen Weg für den leichten Durchgang der Kraftlinien und schneidet ihnen den andern Weg durch den Kern des umlaufenden Ankers ab. Ein Fernsprech-Empfangsapparat mit magnetischem Nebenschluss ist in der Figur 155 abgebildet. *d* ist die gewöhnliche dünne Eisenmembran und *S N* ein stählerner Dauermagnet. Zwischen den Polen des Letzteren ist ein kurzer, von einer Wickelung umgebener Kern angebracht. Einige magnetische Kraftlinien werden durch die Eisenplatte, andere durch den Kern gehen. Fliesst der Strom um den Kern in der Weise, dass er die magnetische Strömung durch Letzteren vermehrt, so wird er den Theil der magnetischen Strömung vermindern, der durch die Platte geht. Fliesst der Strom in entgegengesetzter Richtung, so wird er einen Theil der Kraftlinienströmung aus dem Kern treiben und die Strömung durch die Scheibe verstärken. Diese Form wurde unabhängig von Carpentier und von dem Verfasser erfunden.

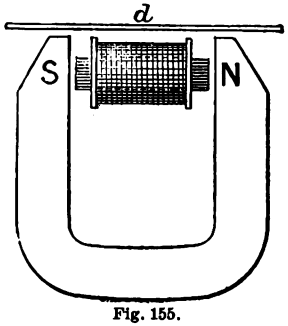


Fig. 155.

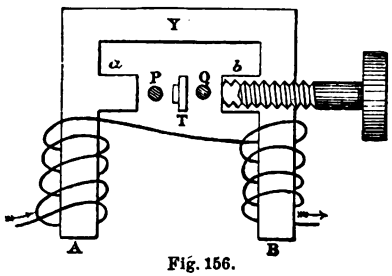


Fig. 156.

Im Relais von d'Arlincourt finden wir eine magnetische Nebenschliessung von eigenthümlicher und empfindlicher Art. Im Allgemeinen ist der Apparat in der Figur 156 dargestellt.

Die Spulen sind auf zwei Kerne gewunden, die an ihren unteren Enden nicht durch einen Steg miteinander verbunden sind. Oben befinden sich zwei vorspringende Polstücke *a* und *b*, zwischen denen die polarisirte Zunge *T* liegt, deren Bewegung durch zwei nicht magnetische Anschläge *P* und *Q* begrenzt ist. Eine eiserne in ein Loch des Polschuhes *B* eingepasste Schraube dient zum Stellen des Apparates. Oberhalb der beiden Polstücke sind die beiden Kerne durch einen eisernen Steg *Y* verbunden, der wie eine magnetische Nebenschliessung wirkt. Fliesst ein magnetisirender Strom durch die Spulen in der durch Pfeile angegebenen Richtung, so entstehen Kraftlinien, die durch den Schenkel *A* aufwärts und

Digitized by Google

durch B abwärts gehen, einige fliessen quer durch a und b, andere gehen durch den Nebenschluss Y. Die Vertheilung der magnetischen Strömung ist in der Figur 157 erläutert. Wenn die Zunge T dadurch polarisirt ist, dass sie an dem Südpol des polarisirenden Magnetes befestigt ist, so wird sie gegen den Anschlag P gezogen, wenn der Strom in der gezeichneten Richtung fliesst, denn der Polschuh a wird ein Nordpol, b ein Südpol sein. Nun könnte die Zunge mit einer Feder versehen werden, die das Bestreben hat, sie in der Mittellage zu halten und von dem Anschlage P wegführen würde, sobald der Strom unterbrochen wird; die Rückbewegung der Zunge würde jedoch Zeit erfordern. d'Arlincourt fand, dass die Zunge des Relais schneller arbeitet, wenn der Nebenschluss Y vorhanden ist. Die angegebenen Gründe zur Erklärung der vergrösserten Empfindlichkeit waren jedoch insgesammt nicht genügend[1]). Der wahre Grund ist folgender: Je enger der Kreis eines elektromagnetischen Apparates geschlossen ist, um so weniger rasch verliert er seinen Magnetismus. Im Kapitel III über die Eigenschaften des Eisens ist nachgewiesen worden, dass ein Zwischenraum im magnetischen Kreise die Entmagnetisirung beschleunigt. Da nun keine Querverbindung unterhalb von A und B sich befindet, und der Nebenschluss Y von den Spulen entfernt ist, so wird er der letzte Theil sein, der seinen Magnetismus zurückhält; da die magnetischen Kraftlinien im unteren Theil verschwinden, so kommt ein Augenblick, in dem, wie in Figur 158 dargestellt ist, das Strömen von a nach b sich umkehrt. In diesem Augenblick wird die Zunge in der anderen Richtung von P nach Q geworfen.

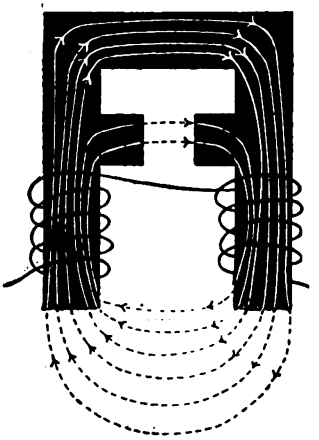


Fig. 157.

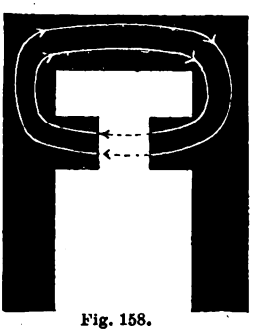


Fig. 158.

1) vergl. den Vortrag von Brough im Journal of the Society of Telegraph Engineers Bd. IV S. 418. 1875.

Digitized by Google

XI. Elektromagnetische Adhäsion.

Vor vierzig Jahren wurde vorgeschlagen, den Elektromagnet dazu zu verwenden, Adhäsion zwischen den Triebrädern von Maschinen und den Eisenschienen, auf denen sie laufen, zu erzeugen. Die von Nicklès zu jener Zeit auf der Eisenbahn nach Lyon angestellten Versuche waren wegen der damals angewendeten ungenügenden Mittel, die Räder zu magnetisiren, nicht ermuthigend. Später fand man eine bessere Form für den Magnet. Dieselbe ist der Circular-Elektromagnet von Weber (Fig. 32); der Vorschlag von Nicklès ging dahin, die Triebräder mit Nuthen im

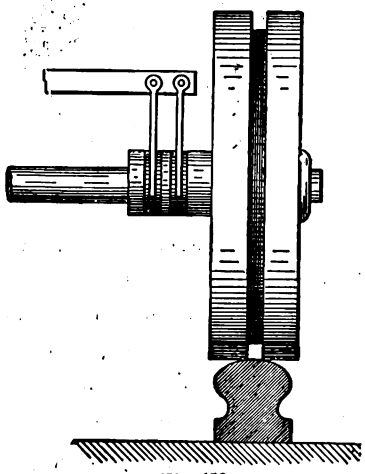


Fig. 159.

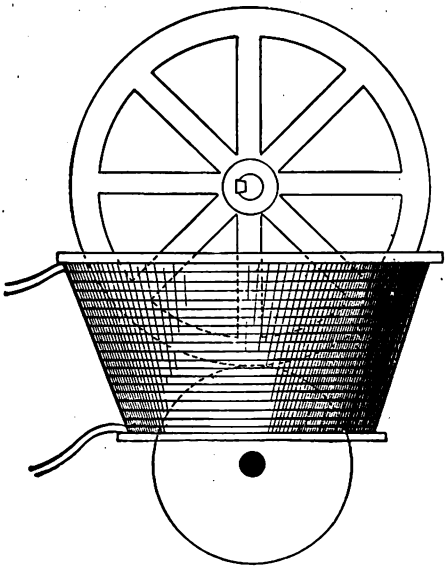


Fig. 160.

Kranze herzustellen, wie in Figur 159 dargestellt ist. In diesem Falle wird ein Rand ein Nordpol, der andere Rand ein Südpol, der magnetische Stromkreis wird gerade an der Stelle geschlossen, an der Berührung mit der Schiene eintritt.

Eine andere Art, elektromagnetische Adhäsion bei Übertragung von Bewegung zu verwenden, wird in Figur 160 dargestellt. Die Bewegung zwischen zwei Rädern ohne Zähne wird hier durch eine rein magnetische Wirkung übertragen. Die Ränder beider Räder bestehen aus Eisen und werden sich stark anziehen, wenn ein elektrischer Strom in einer umgebenden Kupferspule fliesst.

Digitized by Google

Scheidungsapparate.

Scheidungsapparate sind solche, bei denen Magnetismus angewendet wird, um Eisen von unmagnetischen Materialien zu trennen.

Schon im Jahre 1792 wurde William Fullarton in England ein Patent ertheilt, Eisenerze durch Anwendung magnetischer Anziehung — offenbar mittels Dauermagnete — zu scheiden.

Die erste Form eines Scheidungsapparates, bei dem Elektromagnete benutzt wurden, wurde Arthur Wall im Jahre 1847 patentirt. Darauf folgte im Jahre 1854 die elektrische Scheidungsmaschine von Chenot, bei der Elektromagnete auf einer umlaufenden Scheibe Verwendung fanden. Auf die Scheibe wurde das pulverisirte Eisenerz geschüttet. Die anhaftenden Theile wurden in einiger Entfernung von dem nicht magnetischen Material abgeworfen. Seit jener Zeit sind viele andere Formen erfunden worden, die man in drei Klassen bringen kann.

1) Scheidungsapparate, bei denen das magnetische Metall durch Auffangen an beweglichen Polen eines Magnetes geschieden und später in einem besonderen Kasten niedergelegt wird.

2) Scheidungsapparate, bei denen der Magnet feststeht und nur den Anlass gibt, dass die magnetischen Stoffe an einem sich bewegenden Bande oder einer Trommel haften, die dann den mechanischen Theil der Arbeit bewirken.

3) Scheidungsapparate ohne beweglichen Theil zur Ausführung einer solchen Arbeit. Die Anziehung des Magnetes dient nur dazu, dem Stoffe eine Beschleunigung zu ertheilen, in Folge dessen der Stoff an einer andern Stelle als das nicht magnetische Material niederfällt.

Zu der ersten Klasse gehört ein von der Brush Electrical Engineering Co. erbauter Apparat, der in Figur 161 abgebildet ist. Er wird von den Fabrikanten künstlichen Düngers verwendet, um Nägel, Schraubenmuttern und sonstigen Eisenabfall abzufangen, der sonst die Zerkleinermaschinen beschädigen würde, mittels deren der bei der Herstellung verwendete Kehricht, besonders getrockneter Kuhdünger, gemahlen wird. Dieser Apparat besteht aus einer umlaufenden Trommel, in deren Umfang Fugen zur Aufnahme der Magnetisirungsspulen eingeschnitten sind. Der Apparat ähnelt daher in seiner allgemeinen Anordnung dem Elektromagnet von Weber (Fig. 32). Die Trommel wird durch Dampfkraft umgetrieben, der trockene Kehricht hinübergeworfen;

Digitized by Google

jedes Eisenabfallstück bringt die Trommel in die entgegengesetzte Richtung, wo es mechanisch nach der anderen Seite entfernt wird. Der Strom wird durch Schleifcontacte zugeführt. Maschinen ähnlicher Art werden häufig in Werkstätten benutzt, um Eisenfeilspäne von Messing- und Kupferspänen zu trennen.

Scheidungsapparate werden auch in der Porzellanindustrie zum Auslesen von Eisenstückchen aus dem weissen Chinathon und auch bei der Bleiweissfabrikation verwendet. Eine für solche Zwecke geeignete, von Holroyd Smith angegebene Maschine ist in Figur 162 dargestellt. Der Elektromagnet ist in Figur 163

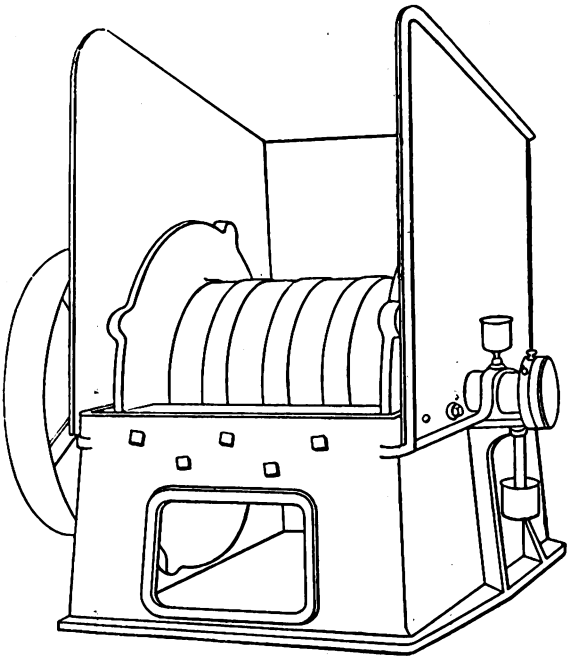


Fig. 161.

in Ansicht und Durchschnitt abgebildet. Er besteht aus zwei halbkreisförmigen, in Angeln hängenden Theilen, die einen inneren Konus umschliessen, der den dünnen Schlamm gegen die innern Pole wirbelt. Die Pole bestehen aus Eisenzähnen — in der Figur 163, mit N und S bezeichnet — und ragen aufwärts und abwärts an den halbkreisförmigen Stücken hervor, die durch eine Anzahl senkrechter Eisenkerne verbunden sind. Auf diese Kerne ist der Draht zur Leitung des Erregerstromes gewickelt. Nachdem die Maschine eine Weile gelaufen ist, werden die halbkreisförmigen

Digitized by Google

Stücke geöffnet; sobald der Strom selbstthätig unterbrochen wird, werden die kleinen Eisentheilchen von den Polen entfernt.

Der Apparat von Conkling zur Scheidung des Eisens von siliceous gangue (einem indischen Stoffe) liefert ein Beispiel von Apparaten der zweiten Klasse.

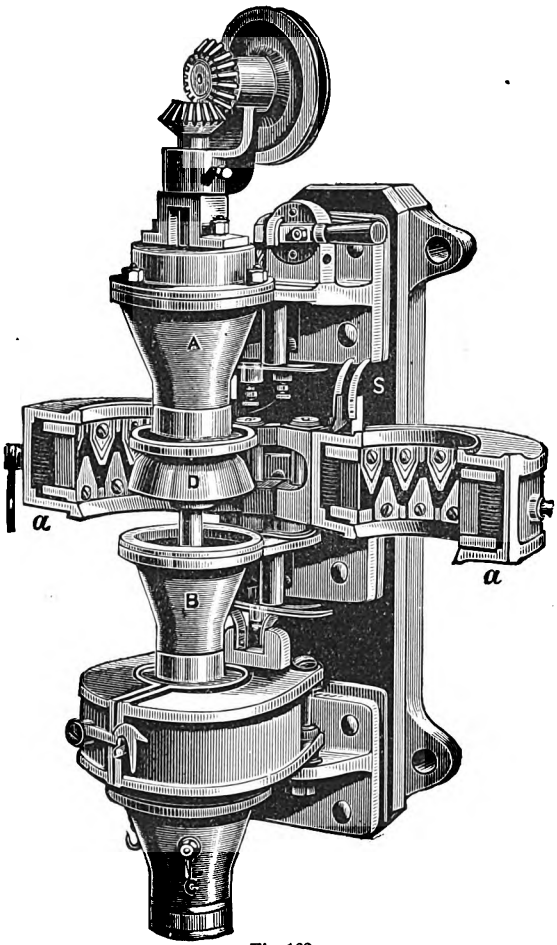


Fig. 162.

Das zu behandelnde Erz wird auf ein endloses, unter beträchtlichem Winkel gegen die Horizontale geneigtes Band gestreut, unter dem ein Wasserstrom entlang rieselt. Unter dem Bande in seiner ganzen Länge liegen zwei Eisenbänder, die Pole einer Reihe von Elektromagneten bilden. Diese bewirken, dass die magnetischen Theilchen an dem Bande haften, so dass sie mit

Digitized by Google

ihm gegen den Wasserstrom geführt und schliesslich in ein passendes Gefäss abgebürstet werden, während das Wasser die nicht magnetischen Theile entfernt.

In dem Apparat von Chase wird das Erz, nachdem es von nicht magnetischen Theilen befreit ist, durch Wasser nach der unteren Seite des Riemens gebracht, der von einer Zahl feststehender magnetischer Pole getragen wird, die eine Bewegung in dem Grade verursachen, wie sich der Riemen fortbewegt. Nur das reinste Erz bleibt nach dieser Bewegung hängen, das Material von mittlerer Eigenschaft fällt von selbst auf eine Stelle zusammen, und wird gesammelt, um von Neuem zermalmt zu werden. Die magnetischen Roller bei dieser Maschine bestehen aus langen Cylindern aus weichem Eisen von geringem Durchmesser (10 *cm* oder weniger); in ihrer Oberfläche sind zwei schraubenförmige Gänge, jeder etwa 2 *cm* breit und tief, eingeschnitten, die in Wirklichkeit eine doppelt geschnittene Schraube darstellen.

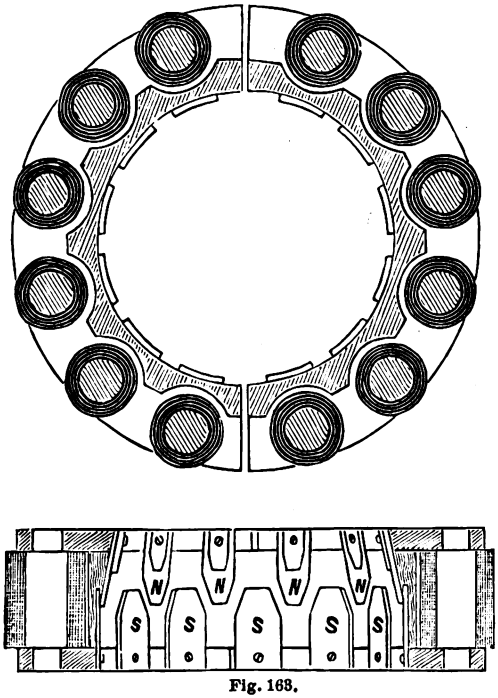


Fig. 163.

In diesen Gängen liegen die isolirten Kupferdrähte, die den Erregerstrom aufnehmen. So entsteht ein Elektromagnet mit fortlaufenden spiraligen Polen, der ein für den bestimmten Zweck geeignetes Feld besitzt.

In dem Apparat von Moffat (Fig. 164[1]), fällt das auszulesende Material aus den Trichtern *C C* auf die eisernen Trommeln *B B*, die um die festen Elektromagnete *A A* umlaufen. Die Elektromagnete werden in diesem Falle durch Wechselstrom erregt. Die zu lösende Aufgabe besteht darin, das Material in drei Klassen zu theilen: 1) magnetische Theilchen, die an *B B*

1) Lum. Electr. Bd. 36. S. 83.

Digitized by Google

anhängend, durch die Bürsten *DD* abgerissen werden, und in *c* fallen; 2) nicht magnetische metallische Theilchen, die gute Elektricitätsleiter sind, in Folge der in ihnen erzeugten Wirbelströme von *BB* abgestossen werden und in *b* fallen; 3) nicht metallischer Abfall.

Die Auslesemaschine von Edison fällt in die dritte Klasse. Bei ihr kann das Eisenfeilicht oder Eisenerz frei aus einem Trichter vor der Oberfläche eines Elektromagnetes vorbeifallen. Die nicht magnetischen Theilchen fallen senkrecht in ein Gefäss, während die magnetischen aus ihrer Richtung abgelenkt werden und in ein anderes Gefäss fallen. In einigen Maschinen befreit ein wagerechter Luftstrom die letzteren vom Staube. Ein Pol eines geraden Magnetes wird den beiden Polen eines hufeisenförmigen Magnetes vorgezogen, weil Letztere geeignet sind, ein Zusammenballen der magnetischen Theilchen, die unmagnetischen Stoff zwischen sich einschliessen würden, zu befördern.

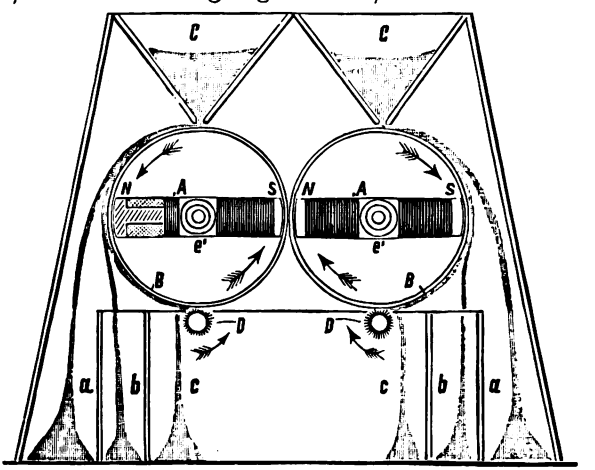


Fig. 164.

Unter anderen Apparaten, die auf elektromagnetischer Adhäsion beruhen, finden wir die elektromagnetische Kuppelung, die für bestimmte Zwecke die Reibungs- und Klauenkuppelung überflüssig machen soll. Vor vielen Jahren suchte Achard Elektromagnete[1]) zu diesem Zwecke zu verwenden: bei den getroffenen Anordnungen war aber die Form des Elektromagnetes[2]) nicht günstig. Eine und zwar durchaus praktische Form einer solchen Kuppelung ist in Figur 165 abgebildet, sie wird durch die Brush Electrical Engineering Company nach Patenten von Wynne und Raworth gebaut.

Der hier benutzte Elektromagnet gehört zu den Formen mit Eisenmantel, ist aber sehr breit und flach gebaut und stellt eine lose eiserne Riemenscheibe mit ungewöhnlich festem Körper dar, in deren Oberfläche eine tiefe und breite Nuth zur Aufnahme der

1) Vergl. Du Moncel, Exposé des Applications (1857). Bd. I. S. 310.
2) Vergl. Specif. of Patent, No. 1668 aus 1855.

Digitized by Google

Spule aus isolirtem Kupferdraht ausgedreht ist. Gegenüber wirkt als Anker eine kräftige Eisenscheibe *A*, die fest auf der Welle sitzt. Zwei Metallbürsten *BB* pressen gegen zwei Ringe aus Rothguss *CC*, die in isolirender Fiber liegen und mit den beiden Enden der Spule verbunden sind. Soll die Kuppelung in Thätigkeit treten, so ist nur nöthig, den Strom anzulassen; die Elektromagnetscheibe wirkt dann auf die Eisenscheibe mit einer Kraft, die man leicht

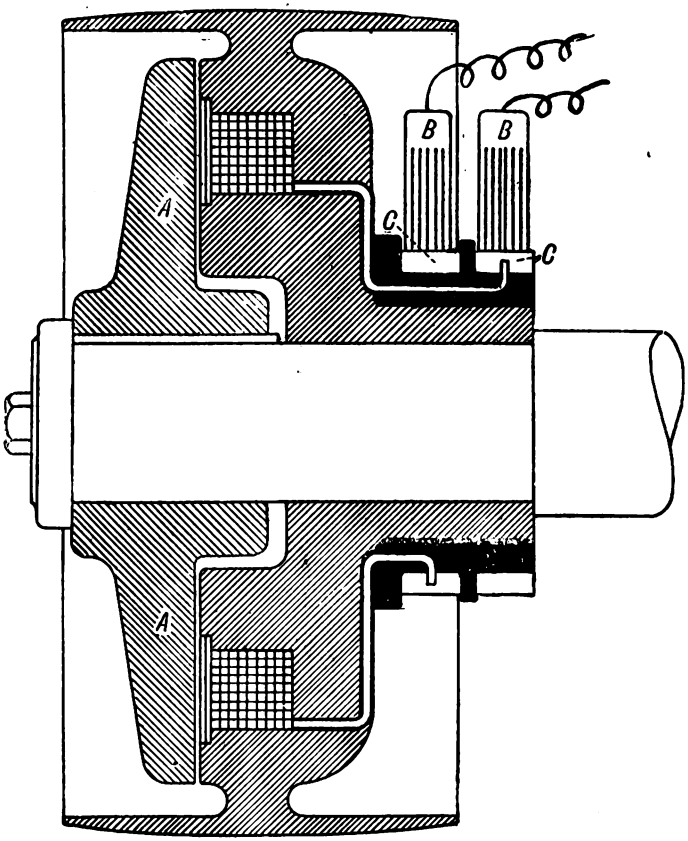


Fig. 165.

auf 7 *kg* für 1 *qcm* Berührungsfläche steigern kann. Die Riemenscheibe dreht sich kräftig mit der Welle. Da der Ausschalthebel für den elektrischen Strom an irgend einer passenden Stelle, näher oder entfernter angebracht werden kann, so liegt auf der Hand, dass eine solche Kuppelung viele Vortheile vor den mechanischen Kuppelungen besitzt. Für Kuppelungen an schwer zugänglichen Stellen ist die Einrichtung ohne Zweifel jeder anderen überlegen.

Digitized by Google

Eine eng verwandte Erfindung ist die elektromagnetische Kuppelung von Williams zum Ersatze von mechanischen biegsamen Kuppelungen, die häufig zur Verbindung der Dampfmaschine und einer mit ihr auf gleicher Bodenplatte aufgestellten Dynamomaschine verwendet werden. Die Kuppelung besteht aus einer eigenthümlichen Art Elektromagnete mit Eisenmantel; sie bestehen aus zwei Hälften, deren Poltheile durch einen innern und äussern Satz symmetrischer Vorsprünge gebildet werden. Wenngleich sie sich nicht berühren, sondern Spielraum lassen, ziehen sie sich doch kräftig an und übertragen einen kräftigen Tangentialzug.

Elektromagnetische Eisenbahnbremsen wurden zuerst im Jahre 1850[1]) von Amberger angegeben und sind zu verschiedenen Zeiten von Achard[2]) und Anderen beschrieben worden. Die neuste

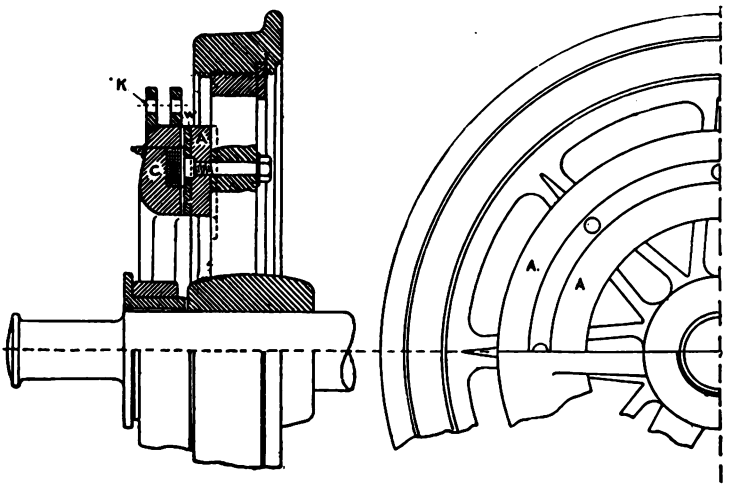


Fig. 166.

Form ist in Figur 166 abgebildet, sie ist eine gemeinschaftliche Erfindung von Forbes und J. A. Timmis. Der Elektromagnet mit Eisenmantel ist dem in der Figur 27 beschriebenen ähnlich. Der Ringkern *C* aus Schmiedeeisen ist durch Bolzen, die durch die Löcher *K* gehen, fest auf die Axbuchse gesetzt und hat eine tiefe Rinne zur Aufnahme der Spulen. Der Anker *AA* ist ein Ring aus Eisen und am Wagenrade verbolzt. Da grosse Oberflächen in Berührung kommen, so dienen ein Paar Eisenscheiben *W* als Polschuhe. Wäre das Rad jedes Wagens eines Eisenbahnzuges

1) Vgl. Erläuterung des Patents No. 13269 von 1850.

2) Genaueres über die Erfindungen von Achard und anderen findet man in La Lumière Electrique Bd. VIII u. IX 1883.

Digitized by Google

mit einer solchen Bremse versehen, so könnten sämmtliche Bremsen durch Anlassen des Stromes auf einmal gleichzeitig in Wirksamkeit gesetzt werden. Der Tangentialzug, den die Bremse ausübt, ist proportional der Stromstärke in den Spulen.

Zwei andere Apparate, die auf elektromagnetischer Adhäsion beruhen, mögen noch erwähnt werden. Bei dem ersten von Colombet herrührenden (Fig. 167) hat eine mechanisch umgetriebene eiserne Welle einen gekrümmten Eisenarm zu heben; wenn solches geschehen soll, wird ein elektrischer Strom in eine die Welle umgebende Erregerspule entsendet. Die Spindel haftet dann magnetisch an dem gekrümmten Arm und unterhält eine rollende Berührung während sie den Arm hebt.

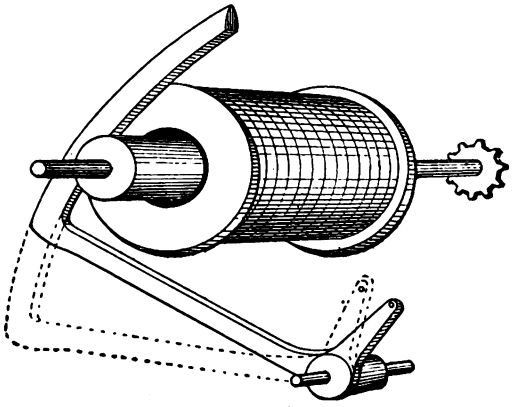


Fig. 167.

Als letztes Beispiel magnetischer Adhäsion möge die magnetische Kuppelung in der Bogenlampe von Gülcher erwähnt werden. Ein auf Zapfen im Gleichgewicht gehaltener Elektromagnet haftet an einem Eisenstab, der den obern Kohlenhalter bildet, und hebt diesen, indem er sich in seinen Lagern neigt.

XII. Apparate für Wechselstrom.

Diese werden im Kapitel XI ausführlich beschrieben.

Einrichtungen für elektrische Klingeln und Anzeiger.

Vor Abschluss dieses Kapitels wollen wir auf einige besondere elektromagnetische Einrichtungen zurückkommen, die für elektrische Wecker und Anzeigeapparate für Wecker benutzt werden[1]). Viele von ihnen liefern einleuchtende Beispiele zu dem

1) Wegen anderer Wecker vergleiche die folgenden Theile dieses Buches: Gewöhnliche elektrische Klingel Fig. 169. Kurzschlussklingel Fig. 170. Klingel für Wechselströme Fig. 142. Abdanks Wechselstromklingel Fig. 143. Klingel Differentialwindungen Fig. 202.

Digitized by Google

allgemein gültigen Grundsatz, dass in der Gestaltung des Systems immer das Bestreben herrscht durch eine Änderung den magnetischen Stromkreis zu verbessern und die Strömung der magnetischen Kraftlinien zu vermehren.

Ein ausgezeichnetes Beispiel liefert das Muster einer elektrischen, von Wagener in Wiesbaden hergestellten elektrischen Klingel (Fig. 168). Der hufeisenförmige Elektromagnet liegt wagerecht, aus jedem Polende ragt ein aufwärts gekrümmter Pflock *P*. hervor. Auf beiden Pflöcken hängt der Anker *A*, der zwei abwärts gerichtete Bohrungen besitzt. Er ruht an den oberen Kanten der Polenden und vervollständigt so in einem Sinne den

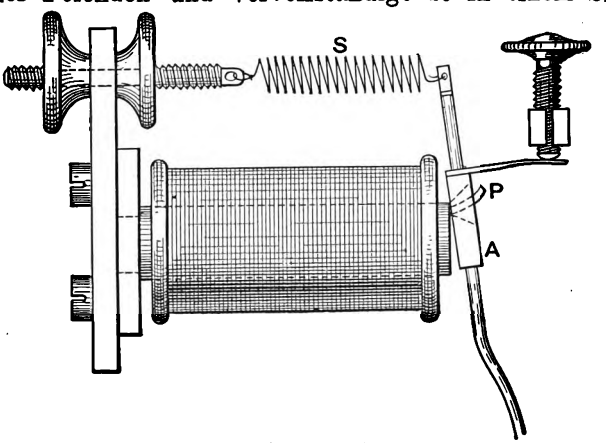


Fig. 168.

magnetischen Stromkreis, wird aber durch eine Spiralfeder *S* zurückgehalten, so dass zwischen ihm und den Poloberflächen ein enger Winkelraum bleibt. Wenn er sich so bewegt, dass er den Raum schliesst, indem er auf den beiden Pflöcken gleitet, so verbessert er den magnetischen Stromkreis, und wird in Schwingung versetzt, da in Folge der Bewegung der Stromkreis wieder unterbrochen wird. Die Empfindlichkeit kann man der Anordnung, wie die anfänglich eingenommene Lage die magnetische Erregung unterstützt, zuschreiben.

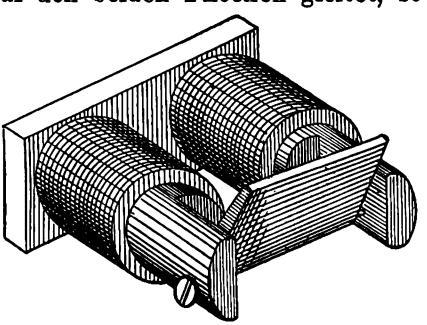


Fig. 169.

Figur 169 erläutert einen verwandten Fall. Ein flacher Eisenanker dreht sich zwischen den zu seiner Aufnahme aus-

Digitized by Google

geschnittenen Polen eines Elektromagnetes; ist der Magnet nicht erregt, so fällt der Anker in eine schräge Lage und zeigt eine Signalscheibe, die an einem aufrecht stehenden Arm am Anker angebracht ist (in der Figur nicht angegeben), hinter einer

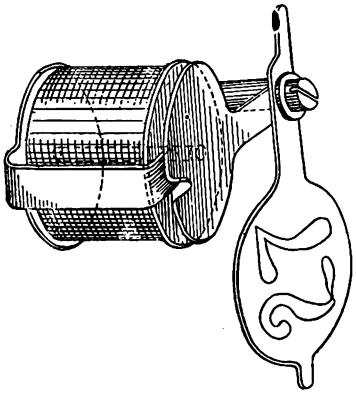


Fig. 170.

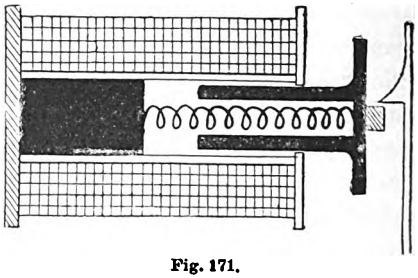


Fig. 171.

Oeffnung des Zeigerkastens. Fliesst Strom durch die Rollen des Elektromagnetes, so wird der Anker angezogen und die Scheibe verschwindet.

Der Zeichengeber von Thorpe (Fig. 170) besteht aus einem einfachen Kern in der Mitte, der von einer Spule umgeben ist, während ein kleiner Eisenstreifen, der von dem einen Ende des Kernes über die Spule weg zum andern Ende ragt (in der Figur von links nach rechts) bis auf einen geringen Zwischenraum den magnetischen Kreis vervollständigt. Über dem Zwischenraum steht eine flache Eisenscheibe, durch deren Anziehung eine Messingscheibe ausgelöst und zum Fallen gebracht wird.

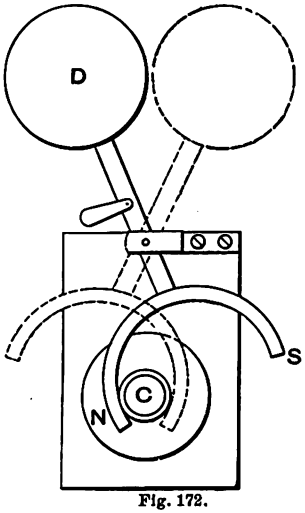


Fig. 172.

Der Anzeiger von Moseley (Fig. 171) besteht aus einer Spule mit einer eintauchenden Eisenröhre, die durch eine Feder hinausgetrieben wird. Wird die Röhre hineingezogen, so lässt ein Ansatz eine Zeichenklappe fallen.

Bei einer gewöhnlichen Form eines polarisirten Zeichengebers liegt ein gekrümmter Dauermagnet aus Stahl *NS* (Fig. 172) drehbar über dem Pole *C* eines kurzen geraden Elektromagnetes,

Digitized by Google

der wagerecht aus einer Rückwand hervorragt. Der drehbare Magnet trägt eine rothe Signalscheibe *D* auf einem senkrechten Arm. Wird ein Strom in einer bestimmten Richtung gesendet, so legt sich der Magnet auf eine Seite, bei Umkehrung des Stromes legt er sich auf die entgegengesetzte Seite. Hierdurch bietet diese Anordnung das Mittel, der Signalscheibe die ursprüngliche Lage elektrisch wieder zu geben; alle polarisirten Apparate besitzen diesen Vorzug. Bei einem Zeigerwerk von Gent wird ein dreipoliger Elektromagnet verwendet (Fig. 173), der eine Spule auf dem mittleren Pole trägt. Wird der Anker angezogen, so kann ein Hebel abfallen, wodurch der Empfang des Zeichens angezeigt wird.

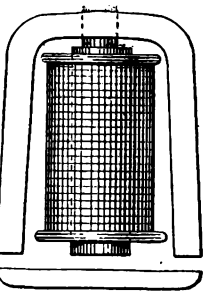


Fig. 173.

Es gibt noch viele andere Zeigerwerke, einige mit Hebeln, die bei der Thätigkeit eines Elektromagnetes ausgelöst werden, bei anderen werden Pendel in Schwingung versetzt. Die oben erläuterten Beispiele werden indessen wohl genügen.

Digitized by Google

Kapitel X.

Elektromagnetische Apparate mit schwingenden Theilen und elektromagnetische Pendel.

Apparate, in denen eine schwingende Bewegung elektromagnetisch aufrechterhalten wird, stehen häufig im Gebrauch. Der Anker eines Elektromagnetes muss sich nähern und entfernen, wenn der Strom selbstthätig unterbrochen und wieder geschlossen wird. Der Anker führt eine schwingende Bewegung aus. Solche Anordnungen findet man in jeder elektrischen Klingel, in den Unterbrechungsfedern der Inductionsspulen, bei elektrisch in Gang gehaltenen Stimmgabeln, bei den Gebern der harmonischen Telegraphen, auch bei einigen veralteten Formen schwingender elektrischer Triebmaschinen, endlich bei den elektromagnetisch betriebenen Pendeln gewisser elektrischer Uhren.

Die elektromagnetischen schwingenden Vorrichtungen haben verschiedene Entwickelungsstufen durchgemacht. Ihre älteste Form entstand im Jahre 1824; es war der schwingende elektrische Draht vom Apotheker James Marsh in Woolwich. Ein am oberen Ende an einer biegsamen metallischen Verbindung aufgehängter Draht, tauchte mit seinem unteren Ende in eine flache Quecksilberschale. Der Draht war zwischen den Polen eines mächtigen Hufeisenmagnetes angebracht. Wurde ein Strom von genügender Stärke durch den Draht gesandt, so wurde er seitlich durch das magnetische Feld getrieben, bei dieser Bewegung hob er den Contakt mit dem Quecksilber auf und fiel zurück, worauf er von Neuem das Spiel begann. Diesem einfachen Apparat folgten Dr. Roget's tanzende Spirale (die auch als Unterbrecher bei Inductionsspulen verwendet wurde) und später Einrichtungen von besserer mechanischer Bauart. Unter diesen wären zu nennen:

Digitized by Google

die schwingenden Hebel von Dal Negro[1]) und von Henry[2]), der Wagner'sche[3]) Hammer, auch als Neef'scher[4]) Hammer bekannt; der schwingende Unterbrecher von Froment[5]). Diesen folgte gegen das Jahr 1850 die Erfindung der jetzigen Form des schwingenden elektrischen Weckers von John Mirand, und anderer Formen von Siemens & Halske und Lippens. Figur 174 erläutert die Einrichtung des gewöhnlichen schwingenden elektrischen Weckers. Sobald der elektrische Strom geschlossen wird, zieht der Elektromagnet E seinen Anker A an und entfernt ihn aus seiner Ruhelage. Die Berührungsfeder S hinter dem Anker hält auf eine kurze Entfernung während der Bewegung des Ankers die Berührung aufrecht, bei weiterer Entfernung tritt Unterbrechung (mit einem Funken) zwischen der Feder und dem Berührungsstift J ein, wodurch der Strom unterbrochen wird. Von diesem Augenblick an beginnt der Magnetismus zu verschwinden, und der Zug vermindert sich, gleichwohl setzt der mit bestimmter Geschwindigkeit sich bewegende Anker vermöge seiner kinetischen Energie die Bewegung solange fort, bis er durch Biegung der Befestigungsfeder aufgehalten wird, die nun anfängt, ihn rückwärts zu treiben. Wieder erhält er Beschleunigung, die Berührungsfeder schlägt gegen den Stift und stellt den Stromkreis wieder her, aber der Anker hält nicht sofort an, sein Beharrungsvermögen

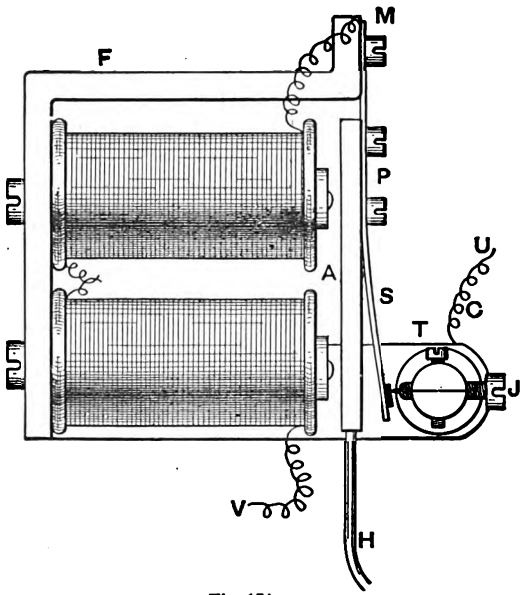


Fig. 174.

1) Ann. Roy. Lomb. Venet. April 1834.
2) Silliman's Journal Bd. XX S. 340 Juli 1831.
3) Poggendorfs Annalen XLVI S. 107 1839.
4) Poggendorfs Annalen XLVI S. 104. 1847.
5) Comptes Rendus XXIX S. 428. 1847 auch Daguin Traité de Physique, Bd. III S. 21.

Digitized by Google

führt ihn fort, und überdies ist Zeit nöthig, bis der Elektromagnet seine volle Anziehungskraft erreicht. Bevor dies erfolgt, ist der Anker einen Augenblick zur Ruhe gelangt und hat bereits wieder begonnen, sich dem Elektromagnet zu nähern. Es ist augenscheinlich, dass in diesem Kreislauf von Vorgängen das mechanische Beharrungsvermögen des beweglichen Theils eine wichtige Rolle spielt, eine nicht weniger wichtige aber auch das elektrische Beharrungsvermögen des Stromkreises. Würde der Strom augenblicklich dem Öffnen und Schliessen des Contactes entsprechen — wenn die Latenz des Elektromagnetes nur eine Dauer von Null besässe —, so würde der Anker im Ganzen nicht mehr während seiner Vorwärts- als während seiner Rückwärts-Schwingung angezogen werden.

Man darf nicht vergessen, dass bei dem Vorgange in einem elektrischen Wecker, wie bei jeder elektromagnetischen Triebmaschine mit drehender oder schwingender Bewegung, die mechanische Bewegung stets von Induction entgegenwirkender elektromotorischer Kräfte im Stromkreise begleitet wird. Es ist zu empfehlen, in Betreff dieses Umstandes eine Abhandlung über dynamoelektrische Maschinen hinsichtlich der Theorie der elektrischen Triebmaschinen zu Rathe zu ziehen. Während der Annäherungsbewegung nach den Polenden der Kerne hin verbessert der Anker den magnetischen Stromkreis, folglich besitzt er das Bestreben, die magnetische Strömung in den Eisentheilen zu verstärken. Hierdurch wird aber eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt, die den Strom schwächt. Wäre die Bewegung so schnell und die elektromotorische Gegenkraft so gross, um in einem Augenblick vollständig den Strom zu dämpfen, und würde in dem gleichen Augenblick die Berührung an der Feder unterbrochen, so wäre kein Funke zu bemerken. Andererseits besitzt der Anker, sobald zurückschnellt, das Bestreben, elektromotorische Kräfte zu erzeugen, die den Strom in der Magnetisirung des Kernes unterstützen, so dass wahrscheinlich der magnetisirende Strom gerade zu der Zeit oder kurz hinterher am stärksten ist, wenn der Anker in seiner entferntesten Lage angekommen ist. In der schwingenden Klingel haben die genauen Phasen dieser Änderungen keine grosse Bedeutung, wohl aber in den harmonisch schwingenden Apparaten z. B. in den elektromagnetisch betriebenen Stimmgabeln. Kein schwingendes Organ wird eine rein harmonische Bewegung ausführen, wenn nicht die Antriebe zeitlich genau abgemessen sind.

Digitized by Google

Bei der einfachen harmonischen Bewegung sind die Kräfte, die das Bestreben haben, die Anfangslage wieder herzustellen, in jedem Augenblicke proportional der Verschiebung, aber vermöge der Reibung nehmen solche Bewegungen ab, wenn sie nicht durch Ausgleichskräfte aufrecht erhalten werden. Nun ist es klar, dass die Reibungskräfte, die durch Bewegung des Systems hervorgerufen werden, am grössten sind, wenn die Geschwindigkeit am grössten ist, d. h. wenn das schwingende System durch die Nulllage geht. Wird in diesem Augenblick ein kleiner Antrieb ertheilt, so kann die von der Reibung herrührende Verminderung der Amplitude ausgeglichen werden. Wird der Antrieb jedoch zu einer anderen Zeit der Schwingung ertheilt; so ruft er eine andere Wirkung hervor, die Schwingungszeit wird geändert und eine Beschleunigung der Phase verursacht.

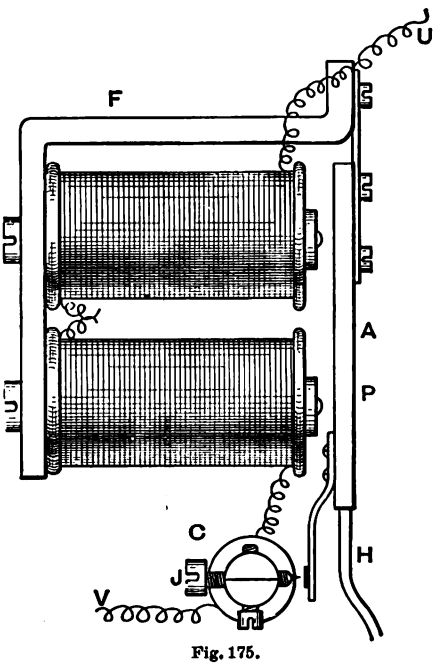


Fig. 175.

Bei Uhren und anderen Einrichtungen mit Pendeln, wird das Pendel nicht isochron ausschlagen, wenn nicht die unterbrochenen Antriebe genau in dem Augenblick ertheilt werden, sobald der bewegende Theil durch die Mittel- oder Nullage geht. Wir werden diese Angelegenheit später in Verbindung mit den Stimmgabeln betrachten.

Bei anderen Anordnungen, die manchmal zur Verhütung der Funkenbildung bei Unterbrechung der Berührung angewendet werden, wird der Strom, anstatt ihn bei Annäherung des Ankers zu unterbrechen, kurz geschlossen. Die Contactsäule wird in diesem Falle auf die entgegengesetzte Seite des Ankers verlegt, so dass die Berührung während seiner Annäherung an die Pole des Elektromagnetes eintritt. Einige Fabrikanten machen von einer Contactsäule keinen Gebrauch, sondern lassen einen Pol des Elektromagnetes deren Vorrichtung ausführen. Sobald der Elektromagnet kurz geschlossen wird, verschwindet sein Magne-

Digitized by Google

tismus. Wenn der Anker am Ende seiner Annäherungsbewegung zur Ruhe gekommen ist, schnellt er zurück. Kein Funke tritt in dem Augenblicke auf, in dem die Berührungsfeder vom Contactstift sich entfernt, weil dann keine Entmagnetisirung vor sich geht. Bei Kurzschlussweckern braucht man daher keine aufgelegten Contactstücke aus Platin. Die Wecker arbeiten auch, wenn zwei oder mehrere von ihnen hintereinander geschaltet werden, was bei gewöhnlichen Weckern nicht der Fall ist. Eine noch vollkommenere Art zur Anordnung der Stromläufe elektromagnetischer Klingeln lässt sich durch den Gebrauch einer Differentialwickelung erreichen. (Siehe Kap. XIV.)

Schwingende Vorrichtung für Inductionsspulen.

Bei Unterbrechungseinrichtungen für gewöhnliche Inductionsspulen wird ein ähnlicher Schwingungsapparat mit Hinzunahme einer Einrichtung verwendet, um die Feder des schwingenden Theiles nach Belieben zu versteifen, so dass dadurch der Betrag der Schwingungen geändert werden kann. Die Unterbrechung, (Fig. 176) besteht aus einer Feder *S*, auf der ein kurzer Eisencylinder *H*, der Hammer genannt, befestigt wird. Die Feder besitzt an der Rückseite einen Platinstift *P*, der gegen einen zweiten Platinstift auf einer Klemmschraube an der Spitze der aufrecht stehendenden Contactschraube *U* drückt. Eine zweite Schraube mit Ebonitkopf *E* führt durch eine Elfenbeinhülse in dem aufrechten Ständer *U* und dient zur Regulirung der Feder. Presst die Feder die Contactstifte nur lose an einander, so tritt die Unterbrechung des Stromes zu einer Zeit ein, zu der der Kern nur schwache magnetische Kraft besitzt. Schraubt man den Contactstift zurück, so dass ein stärkerer Zug zur Unterbrechung des Contactes nöthig ist, so tritt die Unterbrechung nicht früher ein, als bis der Kern stärker magnetisirt worden ist, so dass weit kräftigere Inductionswirkungen erzielt werden.

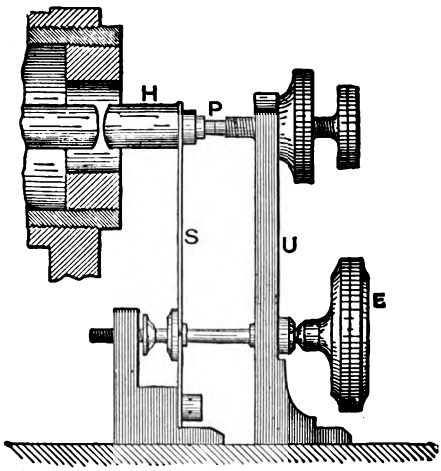


Fig. 176.

Digitized by Google

Unterbrecher für Inductionsspulen sind in verschiedenen Formen angegeben worden. Die besonders langsame Unterbrechung von Foucault[1]) und die besonders schnelle von Spottiswoode[2]) sind beide der Erwähnung werth.

Im Unterbrecher von Spottiswoode (Fig. 177) besteht die schwingende Feder *C* aus einem kräftigen Stück Stahl, das in eine Metallmasse *B* eingeklemmt und durch einen besonderen Elektromagnet *JJ* in Schwingung versetzt wird. Die Amplitude der Schwingung ist sehr klein — ungefähr 0,03 *cm*, die Schwingungszahl beträgt 2500 in der Secunde. Quer über dem Elektromagnet befindet sich eine starke Brücke auf zwei Ständern *DD*. Durch die Brücke führt eine fein geschnittene Contactschraube *E* mit Platinaspitze, an deren oberem Ende ein langer Hebelarm *K* so angesetzt ist, dass er eine feine Berichtigung zulässt. Der Arm *G* dient zum Feststellen des Hebels *R*.

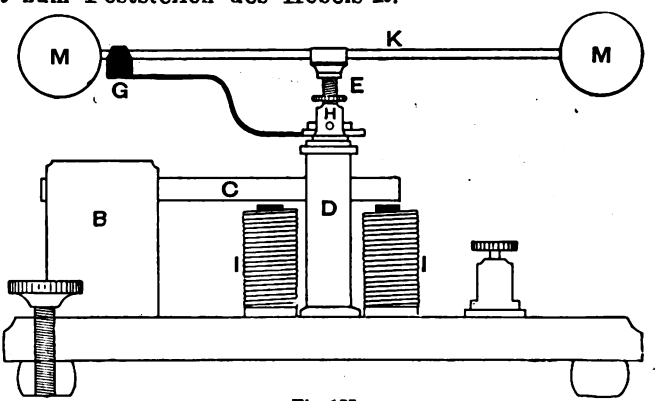


Fig. 177.

Marcel Deprez hat einen schwingenden Unterbrecher für Inductionsspulen beschrieben[3]), der besondere Vortheile besitzen soll.

Elektromagnetische Stimmgabeln.

Lissajous scheint zuerst einen Elektromagnet verwendet zu haben, um Stimmgabeln in Schwingung zu erhalten; die Stromunterbrechung bewirkte ein in Quecksilber eintauchender Draht. Auch Regnault[4]) von Helmholtz[5]) und Andere bedienten sich

1) Recueuil des Travaux scientifiques de A. Foucault 1778.
2) Proc. Roy. Soc. XXIII S. 455.
3) La Lumière Electrique III S. 325.
4) Regnault, Relation des Expériences.
5) Vgl. v. Helmholtz, Tonempfindungen S. 129, 176 u. 604 (Ellis Ausgabe).

Digitized by Google

solcher Stimmgabeln. Mercadier[1]) ersetzte im Jahre 1872 die Quecksilbercontacte durch einen elastischen Griffel. Das Instrument nannte er Electrodiapason. Eine Form dieses Apparates, wie sie von Lacour abgeändert worden ist, ist in der Figur 178 abgebildet. Ein hufeisenförmiger Elektromagnet liegt mit seinen Schenkeln zwischen den Polschuhen $N\,S$ des Elektromagnetes, der die beiden Spulen MM trägt. Die Gabel aus Stahl ist ein Dauermagnet mit den Polen $S\,N$. Auf ihren Schenkeln sind zwei schwere Massen $\pi\,\pi$ angebracht, die auf den Schenkeln verschoben werden können, so dass die Gabel auf verschiedene Töne anspricht. Der Strom tritt durch den Block B in die Gabel ein und durch die Contactfeder c aus. Zuweilen wird nur eine einfache elektrische Spule an Stelle des äusseren Elektromagnetes zwischen die Zinken der Gabel gebracht.

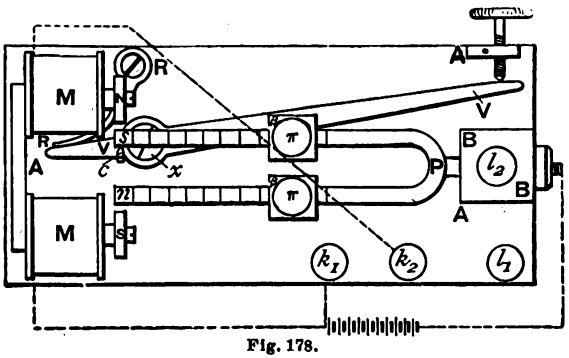


Fig. 178.

Bei allen solchen Apparaten ist die Beobachtung der Bewegungsphase, bei der der erhaltende Antrieb ertheilt wird, wesentlich. Lord Rayleigh, dessen Autorität in akustischen Angelegenheiten ausser Zweifel steht, hat diese Frage mit grosser Klarheit in einer Discussion über eine frühere Form elektromagnetischer Stimmgabeln behandelt, bei der sich eine Spule zwischen den Zinken der Gabel befand, und die eine periodische Unterbrechung mittels eines U-förmigen, auf dem unteren Zinken befindlichen Reiters bewirkte. Der Reiter tauchte in Quecksilberschälchen. Die folgende Stelle ist aus Lord Rayleighs Werk über den Ton entnommen.

Der modus operandi dieser Art selbstthätigen Instruments wird oft unvollkommen erfasst. Wenn die auf die Gabel wirkende Kraft allein von ihrer Lage abhinge — gleichgültig ob der Strom-

1) Comptes rendus 1873, Journal de Physique 1873 Bd. II. S. 350 und Annales Télégraphiques Juli und August 1874.

Digitized by Google

kreis offen oder geschlossen ist —, so würde die Arbeit, die beim Durchgang durch irgend eine Lage verrichtet wird, bei der Rückkehr nicht verrichtet werden, so dass nach einer vollständigen Periode nichts vorhanden wäre, wodurch die Wirkung der Reibungskräfte ausgeglichen werden könnte. Eine Erklärung, welche die Verzögerung des Stromes nicht in Rechnung zieht, ist ganz bedeutungslos. Es gibt zwei Ursachen für die Verzögerung, nämlich den unregelmässigen Contact und die Selbstinduction. Wenn die Spitze des Reiters zuerst das Quecksilber berührt, ist der Contact wahrscheinlich wegen des Anhaftens von Luft unvollständig. Beim Verlassen des Quecksilbers wird der Contact hingegen durch Anhaften der Flüssigkeit an dem amalgamirten Draht verlängert. Aus beiden Ursachen wird der Strom hinter dem, was der genauen Lage der Gabel entspricht, verzögert. Aber selbst wenn der Widerstand des Stromkreises von der Lage der Gabel allein abhängig wäre, würde der Strom doch durch seine Selbstinduction verzögert werden.

Welche Ursache immer wirken möge, so bedingt die Wirkung der Verzögerung, dass während des Rückganges des Reiters aus dem Quecksilber mehr Arbeit von der Gabel gewonnen wird, als während des Eintauchens verloren geht. So bleibt ein Ausgleich, der gegen die Reibung verwendet werden kann. In Ermangelung anderer Mittel, kann jede gewünschte Verzögerung dadurch erzielt werden, dass man den Reiter nicht auf die Gabel selbst, sondern am entfernten Ende einer leichten geraden Feder an der Gabel setzt, so dass die Feder durch Bewegung ihres Befestigungspunktes in starke Schwingung geräth.

Die Abweichung eines Stimmgabelunterbrechers von seinem natürlichen Zinkenstande ist praktisch sehr gering, aber die Thatsache, dass eine solche Abweichung überhaupt möglich ist, erscheint auf den ersten Blick überraschend. Die Erklärung (im Falle einer kleinen Verzögerung des Stromes) ergibt sich daraus, dass während der halben Bewegung, bei der die Zinken am weitesten getrennt werden, der Elektromagnet mit Hülfe der eigenen zunehmenden Kraft wirkt und so den Zinkenstand vergrössert. Welche Beziehung die Phasen haben mögen, die Kraft des Magnetes lässt sich in zwei Theile zerlegen, die beziehungsweise proportional der Geschwindigkeit und Verschiebung (oder Beschleunigung) sich verhalten. Ersterem entstammt ausschliesslich die erhaltende Kraft, dem zweiten die Änderung des Zinkenstandes.

Digitized by Google

Um Übereinstimmung zwischen Antrieb und den Phasen der Lage zu erzeugen, wie sie einen wirklichen Isochronismus in den Schwingungen der Gabeln sichern können, hat man verschiedene Einrichtungen angegeben. Der Herausgeber dieses Werkes[1]) schlug vor, zwei übereinstimmende Gabeln zu benutzen, bei der jede den Stromkreis des Elektromagnetes der andern reguliren sollte. Andere Angaben sind von J. Viriamu Jones[2]) und von Gregory[3]) gemacht worden.

Elektrische Pendel.

Elektrisch betriebene Pendel unterliegen derselben Bedingung wie Stimmgabeln, nämlich, dass zur genauen Erhaltung der Schwingungszeit der Antrieb nur gegeben werden darf, wenn der bewegliche Theil durch die Nulllage geht. Viele Erfinder haben versucht, Uhren zu bauen, die nicht durch Schwerkraft oder Federkraft, sondern durch elektrische Kraft getrieben werden; das Pendel erhält den Antrieb periodisch von einer elektrischen Batterie und treibt selbst die Zeiger mittels eines Sperrrades und Sperrklinken. Bei einigen von Wheatstone und anderen von Bain erfundenen Uhren wurde die Pendellinse periodisch durch Elektromagnete angezogen. Bei anderen von Robert Houdin, Froment, Détouche und anderen Erfindern wird ein anderer Theil periodisch durch einen Elektromagnet angezogen und die Bewegung dem Pendel mechanisch mitgetheilt. In einer neueren Form von Hipp besitzt das Pendel unterhalb der Linse einen Eisenanker, führt zehn oder zwölf freie Bewegungen aus, während dessen seine Amplitude durch Reibung sich verkleinert. Wenn der Schwingungsbogen sich bis zu einer bestimmten Grenze verkleinert hat, tritt die Wirkung eines Elektromagnetes ein, der dem Anker einen plötzlichen Stoss gibt und das Pendel über einen grösseren Bogen schwingen lässt. Die besondere Vorkehrung zur Ausführung dieses Vorganges — eine Einrichtung von Froment — besteht aus einer kleinen Schleifzunge, die am unteren Ende des Pendels befestigt ist und etwas oberhalb einer Feder hinweggeht, sobald der Schwingungsbogen lang ist, aber die Feder erfasst und niederdrückt, wenn der Schwingungsbogen unterhalb einer bestimmten

1) Phil. Mag. Aug. 1886 S. 216.
2) Proc. Physical Society S. 288 1890.
3) ebenda 1889.

Digitized by Google

Grösse bleibt. Wegen weiterer Einzelheiten dieser Einrichtungen möge auf Abhandlungen über elektrische Uhren verwiesen werden[1]).

Harmonische Telegraphenapparate.

Bei den harmonischen Telegraphen von Varley, Lacour, Elisha Gray, Langdon-Davies und anderen, werden schwingende Theile zur Hervorbringung intermittirender Ströme oder von Wechselströmen verwendet. Nur zwei von ihnen mögen hier beschrieben werden.

Elisha Gray's Sender. Bei diesem Apparat ist ein abgestimmter Stab oder ein Stahlröhrchen zwischen zwei getrennten Elektromagneten, die abwechselnd anziehend wirken, angebracht. Figur 179 zeigt die Anordnung des Apparates; der Linienstrom ist in voller Linie, der Ortstromkreis zur Erzeugung der Schwingung in gestrichelten Linien gezeichnet. Dicht am Ende des schwingenden Stabes L sind zwei Federn befestigt, die Contact mit zwei Anschlagstiften b und b' herstellen. Der Elektromagnet e zur Rechten besitzt viele Windungen aus dünnem Draht (ungefähr 30 Ω Widerstand) während der linke e' wenige Windungen dicken Drahtes besitzt (3 oder 4 Ω Widerstand). Wenn derselbe Strom durch beide Wickelungen fliesst, wird der Elektromagnet mit zahlreichen Windungen (zur Rechten) die kräftigere Anziehung ausüben. Dies geschieht so oft, als durch Niederdrücken der Taste M der Ortsstromkreis bei c geschlossen wird. Wenn aber der Stab nach rechts angezogen ist, kommt er mit dem Anschlag b in Berührung, so dass der Kurzschluss des Elektromagnetes e erfolgt. Der aus-

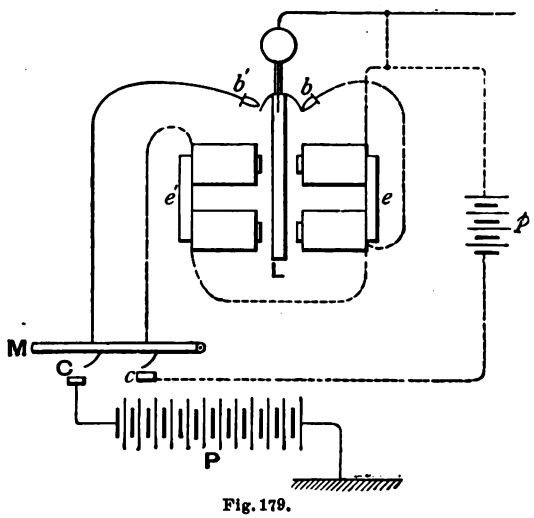


Fig. 179.

1) Die neusten von ihnen sind — Favarger, L'Electricité et ses Applications à la Chronométrie Paris. 1886; Merling, Die elektrischen Uhren, Braunschweig 1884; Fiedler, Die Zeittelegraphen. Wien 1889, auch Du Moncel, Exposé des Applications de l'Electricité Bd. II und Kareis, Der elektromagnetische Telegraph, Braunschweig 1888.

Digitized by Google

geschaltete Elektromagnet hört auf zu wirken, während zu gleicher Zeit ein stärkerer Strom durch den Elektromagnet e' fliesst, der den Stab L nach links zieht. Der Stab wird dadurch in Schwingungen versetzt und sendet entsprechend starke intermittirende Ströme aus der Linienbatterie P über den Anschlag b' in die Leitung.

Langdon-Davies's Regulator.

Langdon-Davies hat ein harmonisches Telegraphensystem in Verbindung mit einer eigenthümlichen Inductionseinrichtung erfunden, das als Phonopore bekannt ist. Indem er schnell schwingende, verschiedenen Noten entsprechende Ströme benutzt, die in Punkte und Striche aufgelöst werden, ist er im Stande zwei, drei oder mehr Telegramme zu gleicher Zeit durch dieselbe Leitung zu befördern. Um dieses ohne Hinderniss zu bewirken, müssen die schwingenden Theile sowohl beim Sender als auch beim Empfänger äusserst genaue Schwingungen ausführen. Gewöhnliche Stimmgabel-Unterbrecher, wie die vorhin beschriebenen, reichen für den Zweck nicht genügend aus. Die schnarrenden Töne, die von ihnen ausgehen, beweisen, dass ihre Schwingungen beständig sich ändern und von den auf sie einwirkenden elektromagnetischen Kräften nicht unabhängig sind. Dies folgt aus den nicht genau in der geeigneten Bewegungsphase ertheilten Antrieben. Zur Beseitigung dieses Übelstandes stellte Langdon-Davies einige hundert Versuchseinrichtungen mit Röhren, Stimmgabeln und gestreckten Stahlbändern als Unterbrecher her. Die endgültige Form eines Senders bezeichnet er als „rate governor" d. h. Schwingungsregulator (Fig. 180).

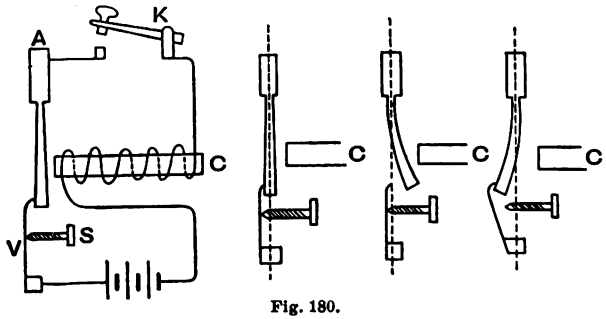


Fig. 180.

Die abgestimmte Röhre A liegt gegen eine leichte Feder an, die genau während der Hälfte der periodischen Bewegung der Röhre Contact herstellt und durch eine Anschlagschraube S verhindert wird, der Bewegung der Röhre zu folgen. C ist der magnetische Kern, der die Röhre anzieht, wenn die Taste K gedrückt wird. Die drei Hauptlagen der Röhre sind etwas übertrieben auf der rechten Seite der Figur dargestellt.

Digitized by Google

Kapitel XI.

Elektromagnete für Wechselstrom.

Alle Elektromagnete zum Gebrauch für Wechselströme müssen mit geblätterten Kernen versehen sein, damit der Umlauf inducirter Wirbelströme innerhalb der Eisenmasse verhindert wird. Ferner müssen alle Rahmen, Gestelle, oder Metallspulen, die sonst geschlossene metallische Stromkreise um die Kerne herum bilden, zertheilt oder durch nicht leitendes Material getrennt werden, weil auch in ihnen sonst Wirbelströme inducirt werden.

Art der Blätterung.

Es gibt verschiedene Arten zur Ausführung der Blätterung; bei allen ist die Regel inne zu halten, dass das Eisen in einer Richtung unter rechtem Winkel zu der Richtung getheilt wird, in der die Wirbelströme entstehen würden. Weil diese das Bestreben haben, parallel zu den die Kerne umgebenden Spulen zu verlaufen d.h. quer zur Länge, so folgt, dass jede Zertheilung in der Längsrichtung der Spulen vorgenommen werden muss.

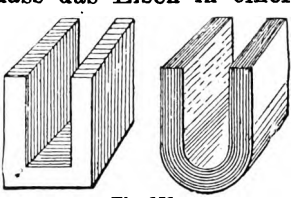


Fig. 181.

Für Kerne gerader Elektromagnete nimmt man gewöhnlich ausgeglühte Eisendrähte von 1 bis 2 *mm* Stärke in ausreichender Zahl, um Kerne der gewünschten Form herzustellen. Man sollte solche Drähte einzeln firnissen und sie dann in Bündel zusammenfassen, indem man sie leicht mit Zwirn oder schmalem Bande umbindet, das später mit Firniss bedeckt wird. Metallische Bindedrähte sollten nicht benutzt werden.

Für grössere Elektromagnete und solche in Hufeisenform werden dünne Blätter aus Eisen bevorzugt. Zwei Arten, zertheilte Kerne aus Eisenblättern herzustellen, ergeben sich aus der Figur 181. Bei Ausführung der ersten Art wird eine Reihe rechtwinklig gebogener U-förmiger Streifen in genügender Zahl zusammengelegt, bei Ausführung der andern Art werden die Eisen-

Digitized by Google

blätter über eine Form gebogen, ein Blatt über dem andern. In jedem Fall sollten die einzelnen Eisenlagen an metallischer Berührung durch Zwischenlagen von gefirnisstem Papier, oder dünnem Glimmer gehindert werden; das Letztere ist jedoch für den gewöhnlichen Gebrauch zu theuer. Einige Fabrikanten lackiren oder emailliren das Eisen zur Verhinderung der Berührung. Es ist von Bedeutung, dass die Ränder der Blätter von jedem Ansatz befreit werden, der eine Berührung von Blatt zu Blatt erzeugen kann. Um die Theile mechanisch zusammen zu halten, kann man Bolzen durchführen, diese müssen aber gegen Berührung durch eine umliegende Röhre aus vulkanisirter Fiber oder Ebonit isolirt werden. Auch muss man Stossscheiben aus Fiber oder Ebonit unter die Bolzen-Köpfe und -Muttern legen. Wenn gut mit Schellackfirniss behandeltes Papier zwischengelegt worden ist, kann man, um den ganzen Kern zu einer Masse zu gestalten, ihn mit Firniss bedecken und in einem Ofen bis zu einer Temperatur erhitzen, unter deren Wirkung der Schellack weich wird. Dann wird der Kern zusammengepresst, bis er abgekühlt ist.

Die zum Eintauchen in Spulen verwendeten Kerne müssen ebenfalls geblättert sein, wenn Wechselströme angewendet werden.

Eigenschaften der Elektromagnete für Wechselstrom.

In neuerer Zeit hat man den Eigenschaften der Elektromagnete für Wechselstrom viel Aufmerksamkeit gewidmet. Es finden sehr wesentliche Unterschiede zwischen ersteren und Elektromagneten Statt, die mittels gleichgerichteter, stets in derselben Richtung fliessender Ströme erregt werden. Ein gewöhnlicher, durch einen stetigen Strom erregter Elektromagnet zieht kein gewöhnliches, nicht magnetisches Metall an, weder Kupfer, noch Silber oder Messing, noch stösst er sie ab, höchstens in einem so geringen Maasse, dass es ganz besonderer Apparate bedarf, um die feinen Wirkungen sichtbar zu machen. Die sogenannte diamagnetische Abstossung der Metalle, die darin begründet ist, dass die Metalle weniger durchlässig als das sie umgebende Medium, Luft z. B. sind, ist in ihrer Wirkung so gering, dass man sie nicht besonders zu betrachten braucht. Es soll jedoch gezeigt werden, dass ein Elektromagnet für Wechselstrom auf eine Kupfermasse lebhaft und kräftig abstossend wirkt. Diese Wirkung entsteht aus einer wechselseitigen Thätigkeit zwischen dem Elektro-

Digitized by Google

magnet und den Strömen, die er in dem benachbarten Metallstück hervorruft.

Hier bietet sich uns eine wichtige Betrachtung in Bezug auf die Phasen elektrischer Ströme dar. Zwei parallele Ströme ziehen sich an (oder besser die Leitungsdrähte, in denen die Ströme fliessen, ziehen sich an) vorausgesetzt, dass die Ströme nach gleicher Richtung fliessen; sie stossen sich ab, wenn die Ströme in entgegengesetzter Richtung fliessen. Bei Strömen, die erst in einer, dann in anderer Richtuug mit grosser Geschwindigkeit fliessen, ist es klar, dass zwei parallele Leiter sich nicht anziehen, wenn die Wechsel nicht mit einander im Einklang stehen. Ist dies der Fall, so erfolgt Anziehung, stehen die Wechsel nicht im Einklang, erfolgt Abstossung. Befinden sie sich in einem Zwischenzustand der Phasenbeziehung, so wird die Sache verwickelt; wir werden dies noch näher betrachten. Man studirt Wechselströme mit Hülfe von Wellendiagrammen (Fig. 182), in denen die Zeiten als Abscissen, die Stromstärken als Ordinaten aufgetragen werden. Wünschen wir z. B. einen Strom, der 100 Perioden in der Secunde ausführt, und dessen grösste Stärke 10 *A* beträgt, darzustellen, so liefert die Figur 182 ein Bild der Art und Weise. Zur Zeit 0 beginnt der Strom mit der Stärke 0, wächst dann und erreicht sein Maximum von 10 *A* bei der Marke *1* (im vorliegenden Fall in $^1/_{400}$ der Secunde). Nach $^2/_{400}$ Sekunde ist der Strom auf Null gesunken und steht im Begriff die Richtung zu wechseln. Nach $^3/_{400}$ Secunde hat er das umgekehrte (negative) Maximum erreicht und nach $^4/_{400}$ Secunde ist er nochmals auf Null gesunken, um von Neuem zu beginnen. Er hat also einen ganzen Wechsel in $^1/_{100}$ Sekunde vollendet. Seine mittlere Stärke während dieser Zeit würde 7,07 *A*[1]) betragen. Die untere Curve in der Figur 182 stellt einen ähnlichen Strom von gleicher Phase vor, der zu jeder Zeit in derselben Weise, wie der zuerst betrachtete Strom, steigt und fällt. In dem ersten Viertel der Periode (d. h. während des ersten Zeitabschnittes von $^1/_{400}$ Secunde) fliessen beide Ströme

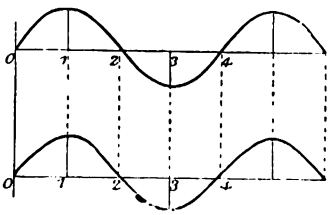


Fig. 182.

1) Der Mittelwerth ist nicht das arithmetische Mittel, sondern die Quadratwurzel aus dem mittleren Quadrat. Der Draht wird z. B. durch diesen Strom, der zwischen 10 *A* und — 10 *A* schwankt, ebenso erhitzt, als durch einen stetigen Strom von 7,07 *A*.

Digitized by Google

gleichartig und erheben sich zum Maximum. In diesem Viertel ziehen sie sich mit einer Kraft an, die ebenfalls zu einem Maximum anwächst. In der nächsten Viertelperiode von 1 zu 2 fliessen beide noch denselben Weg, fallen aber in der Stärke, sie werden sich beide noch anziehen, aber die Anziehung sinkt auf Null. In der nächsten Viertelperiode von 2 zu 3 haben beide Ströme ihre Richtung umgekehrt aber sie sind immer noch im Einklang, so dass sie sich ebenfalls mit einer Kraft anziehen, die ein Maximum bis 3 erlangt. Im letzten Viertel von 3 zu 4 sind sie ebenfalls im Einklang, beide sinken aber auf Null und ziehen sich an, die Anziehung vermindert sich und wird Null am Ende der vollen Periode. Wenn also zwei Wechselströme wie gezeichnet, in ihrem Verlauf im Einklang verfliessen, findet eine Anziehung statt, diese unterliegt aber periodischem Wechsel, indem sie zweimal zum Maximum ansteigt und zweimal zu Null innerhalb einer Periode wird. Würden die Ströme sehr langsame Wechsel ausführen — etwa 3 oder 4 in der Secunde — so könnte man wahrnehmen, wie die beiden parallelen Drähte gegen einander sechs oder acht Mal in der Secunde schwingen. Wenn indessen die Wechsel 100 in der Secunde betragen, (wie solche Ströme bei der elektrischen Beleuchtung Verwendung finden) so folgen die Maxima der Anziehung so schnell aufeinander — 200 Mal in der Secunde — dass die Drähte keine Zeit zu Schwingungen erlangen und gegen einander sich bewegen.

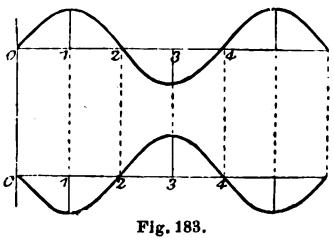


Fig. 183.

Die Figur 183 stellt zwei Wechselströme mit genau entgegengesetzten Phasen dar, es herrscht also vollständige Abweichung. Durch eine ähnliche Betrachtung ergibt sich, dass in jedem Viertel der Periode Abstossung zwischen den Drähten herrschen muss, denn die Ströme beginnen in entgegengesetzter Richtung und gelangen nach der Umkehrung wiederum in entgegengesetzte Richtung. In diesem Falle entstehen in jeder vollständigen Periode zwei Maxima der Abstossung.

Wenn die Ströme, wie die Figur 184 darstellt, eine Phasenverschiebung von einem Viertel der Periode besitzen, so dass ein Strom zu der Zeit zum Maximum gelangt, wenn der andere Null wird und umgekehrt, (Ströme in dieser Phasenbeziehung bezeichnet man als „in Quadratur“ zu einander befindlich, da der Phasen-

Digitized by Google

unterschied 90° beträgt) so würde in dem ersten Viertel der Periode von Null bis 1 der erste Strom positiv sein und zum Maximum anwachsen, der zweite aber in derselben Zeit im entgegengesetzten oder negativen Sinne fliessen und vom negativen Maximum auf Null sinken. Während dieses Viertels muss Abstossung erfolgen, sie wird Null gewesen sein, wenn der erste Strom Null war, und wird wieder Null sein, wenn der zweite Strom Null ist, so dass ein Maximum zu irgend einer zwischenliegenden Zeit oder ungefähr in der Mitte des ersten Viertels eintritt. Im zweiten Viertel der Periode wird eine Anziehung herrschen, weil von 1 bis 2 beide Ströme positiv sind, sie wird auch zum Maximum in der Mitte des Viertels. Im dritten Viertel von 2 bis 3, wenn der erste Strom sich umgekehrt hat, wird Abstossung wie im ersten Viertel herrschen, und im vierten Viertel 3 bis 4 wird wie im zweiten Viertel der Periode wieder Anziehung Statt finden. Hieraus folgt, dass in jedem vollständigen Kreislaufe abwechselnd Abstossung, Anziehung, Abstossung und Anziehung eintreten, und dass, wenn die Ströme genau um 90° in der Phase verschieden sind, die Anziehungen und Abstossungen von genau gleicher Dauer und gleicher Stärke sind. Das Endergebniss ist, dass in solchem Falle die Drähte weder Anziehung noch Abstossung zeigen werden.

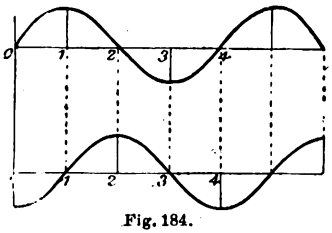


Fig. 184.

Was wird aber geschehen, wenn die Ströme zum Theil ausser Einklang, jedoch so verlaufen, dass sie nicht genau um 90° in der Phase verschieden sind? Dann wird die Dauer der beiden Anziehungen und der beiden Abstossungen nicht gleich sein. Wenn die Ströme in der Phase um weniger als eine Viertelperiode abweichen (also nahezu im Einklang fliessen), werden die Anziehungen sowohl in der Stärke als auch in der Dauer grösser als die Abstossungen sein; im Ganzen wird eine Anziehung stattfinden. Wenn aber die Ströme um mehr als eine Viertelperiode von einander abweichen, werden die Abstossungen überwiegen; in Bezug auf das Ganze wird sich Abstossung geltend machen.

Diese Erklärungen können als Schlüssel zur Erklärung der durch Elektromagnete für Wechselstrom erzeugten besonderen Wirkungen bezeichnet werden.

Es soll zunächst die Wirkung eines Elektromagnetes für Wechselstrom, der in einem seinem Pole gegenüber aufgehängten

Digitized by Google

Kupferringe Wirbelströme erzeugt (Fig. 185), betrachtet werden. Angenommen, in der Spule fliesse ein Strom in solcher Richtung, dass er oben eintritt und vorn unten austritt, und dass seine Stärke zunehme. Er möge das Bestreben besitzen, das dem Ringe R nahe liegende Kernende zum Nordpol N zu machen, der ebenfalls in der Stärke zunehmen und seine magnetischen Kraftlinien in steigender Zahl in den Raum senden wird. Diese Verstärkung der magnetischen Strömung durch den Kupferring hat das Bestreben, in dem Ringe elektromagnetische Kraft zu induciren und zwar in der durch den weissen Pfeil angedeuteten Richtung; die Kraft besitzt die entgegengesetzte Richtung wie die Kraft in der dem Ringe zugewandten Spule. Diese elektromagnetische Kraft ruft einen Wirbelstrom im Ringe hervor. Solche inducirten elektromagnetischen Kräfte sind dem Betrage der Änderung des Magnetismus proportional; die Änderung des Magnetismus ist aber

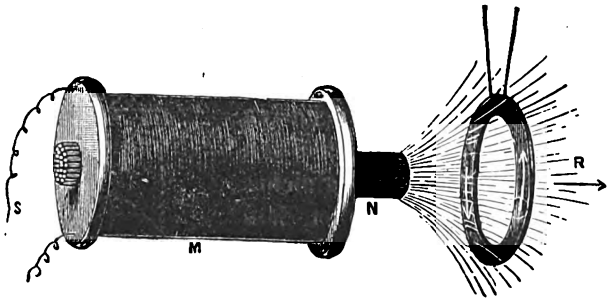


Fig. 185.

am grössten, nicht wenn der Magnetismus selbst sich im positiven oder negativen Maximum befindet, sondern wenn er zu Null wird und sein Vorzeichen wechselt. Hieraus folgt, dass, sobald der Magnetismus der Spule Kreisläufe von Änderungen erfährt, wie unter Einwirkung von Wechselstrom dies erfolgt, die inducirte elektromotorische Kraft im Ringe Wechseln unterliegt, die mit denen im Elektromagnet in Quadratur stehen (um 90° in der Phase verschieden sind). Wenn wir nun annehmen, dass die Kreisläufe der Magnetisirung genau mit den des erregenden Stromes Schritt halten, und wir ferner annehmen — was jedoch nicht zutrifft — dass die im Ringe inducirten Wirbelströme genau mit den elektromotorischen Kräften, die im Ringe durch den Elektromagnet entstehen, im Einklang verlaufen, so würde folgen, dass der im Ringe inducirte Wirbelstrom um 90° in der Phase von dem Erregerstrom im Magnet (wie Fig. 184) unterschieden ist; so würde

Digitized by Google

der Ring als Ganzes weder angezogen noch zurückgestossen werden. Aber der Ring besitzt in Wirklichkeit eine Zeitconstante (siehe S. 195) an sich. Das Angehen oder Verschwinden eines Stromes in solchem Ringe erfordet Zeit. Alle Wirbelströme bleiben hinter den sie erzeugenden elektromotorischen Kräften in der Phase zurück. Folglich sind die Ströme im Ringe nicht in Quadratur mit den Wechseln des Magnetismus im Elektromagnet; die Phasenverschiebung wird mehr als 90° (ein Viertel einer Periode) betragen und der Ring wird abgestossen.

Versuche von Elihu Thomson.

Zutreffende Versuche mit Elektromagneten für Wechselstrom hat Professor Elihu Thomson[1]) aus Lyne Massachusetts ausgeführt. Seine Aufmerksamkeit wurde zuerst auf den Gegenstand durch einen Versuch mit einem Elektromagnet gelenkt, der durch einen gleichbleibenden Strom erregt wurde; der Versuch möge hier mit seinen eigenen Worten beschrieben werden:

„Während wir im Jahre 1884 für die internationale Elektricitätsausstellung in Philadelphia Vorbereitungen trafen, hatten wir die Gelegenheit einen grossen Elektromagnet herzustellen; seine Kerne besassen ungefähr 15 *cm* im Durchmesser und ungefähr 50 *cm* in der Länge. Sie waren aus Bündeln von Eisendrähten mit 0,8 *cm* Durchmesser hergestellt. Wurde der Magnet durch den Strom einer Gleichstrommaschine erregt, so zeigten sich die gewöhnlichen kräftigen magnetischen Wirkungen. Man fand, dass eine flache Kupferscheibe von ungefähr 1,5 *mm* Dicke und 25 *cm* Durchmesser, wenn sie flach gegen einen Pol des Elektromagnetes fiel, sich sanft auf ihn niederlegte; die Verzögerung der Bewegung wurde durch das Entstehen von Strömen in der Scheibe, die in Folge der Bewegung im starken magnetischen Felde entstanden hervorgerufen, denn diese Ströme besassen die entgegengesetzte Richtung wie die Ströme in den Spulen des Elektromagnetes. Es war unmöglich, mit der Scheibe einen scharfen Schlag gegen den Magnetpol auszuführen, wenn der Versuch in der Weise angestellt wurde, dass man die Scheibe am Rande erfasste und sie mit Gewalt gegen den Magnet hinunter bewegte. Bei dem Ver-

1) Siehe Novel Phenomena of Alternating Currents von Elihu Thomson in der Electrical World Mai 1887 S. 258; oder The Electrician 16. Mai 1890 S. 35 u. f. in einer Reihe Artikel von Prof. J. A. Fleming, dem der Herausgeber für die Erlaubniss dankt, die Fig. 185 bis 191 wiederzugeben.

Digitized by Google

suche, die Scheibe schnell von dem Magnet zu entfernen, fand ein gleicher aber entgegengesetzter Widerstand gegen die Bewegung statt; es zeigte sich, dass Ströme in der gleichen Richtung wie in den Magnetspulen entstanden, die Anziehung hervorbrachten. Der Versuch liess sich noch in anderer Weise anstellen. Während man ein Kupferblatt über dem Magnetpol (siehe Fig. 186), hielt, wurde der Strom den Magnetspulen durch Einschaltung eines Nebenschlusses entzogen. Dann fühlte man eine Anziehung der Scheibe oder eine Biegung nach dem Pol zu. Der Strom wurde nun durch Öffnen des Nebenschlusses angelassen, worauf eine abstossende Wirkung oder Hebung der Scheibe bemerkt wurde. Die eben beschriebenen Wirkungen entsprachen den Erwartungen, denn

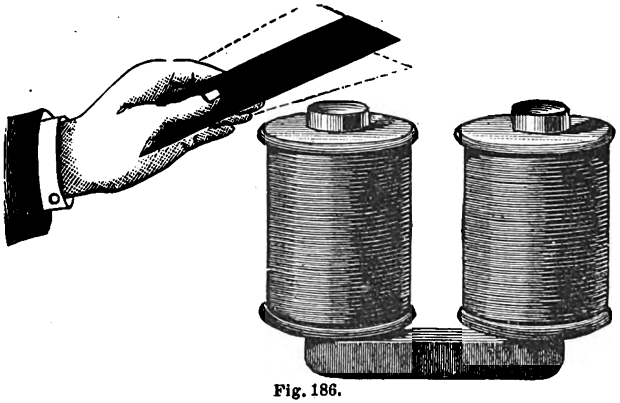


Fig. 186.

wenn Anziehung eintrat, waren Ströme in der Scheibe in gleicher Richtung, wie in den unter ihr befindlichen Magnetspulen inducirt worden, und wenn Abstossung stattfand, besass der in der Scheibe inducirte Strom entgegengesetzte Richtung zum Strom in den Spulen. Angenommen nun, der Strom in den Magnetspulen werde nicht abgeschaltet sondern abwechselnd umgekehrt.

Aus den eben angegebenen Gründen wird dann die Scheibe abwechselnd angezogen oder abgestossen. Die Scheibe kann durch einen Kupferring oder andern guten Leiter, einen blanken oder isolirten Draht, durch eine Reihe von Scheiben, Ringen oder über einander gelegten Spulen ersetzt werden; die Ergebnisse werden gleich bleiben.“ —

Zunächst hatten wir keinen Grund anzunehmen, dass die Wirkung eines Wechselstromes Abstossungen hervorbringen würde, die im Ganzen kräftiger wären als die zwischenliegenden Anziehungen, denn die vorhergehenden Versuche hatten kein An-

Digitized by Google

zeichen irgend welcher verzögernder Wirkungen oder Zurückbleiben bei den inducirten Wirbelströmen erkennen lassen. Diese traten jedoch bald zu Tage, als man einen Wechselstrom anwendete. Die folgenden einschlägigen Versuche gehörten unter die von Elihu Thomson angestellten.

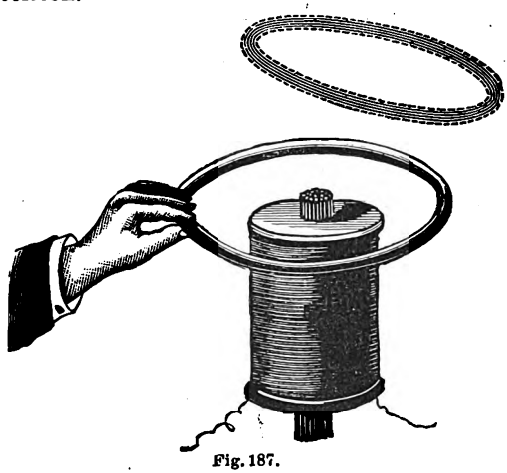


Fig. 187.

Wenn man einen kräftigen Kupferring in der Hand über den Pol eines kräftigen Elektromagnetes für Wechselstrom hält, so bringen die in ihm entstehenden Wirbelströme zwei Wirkungen hervor. Zunächst erhitzt der Strom ihn so stark, dass er schon nach wenigen Sekunden unerträglich heiss wird, ferner wird bewirkt, dass der Ring so stark abgestossen wird, dass Kraft nöthig ist, ihn niederzuhalten; wird der Ring losgelassen, so fliegt er aufwärts als ob er durch eine unsichtbare Feder fortgeschnellt würde. (Fig. 187).

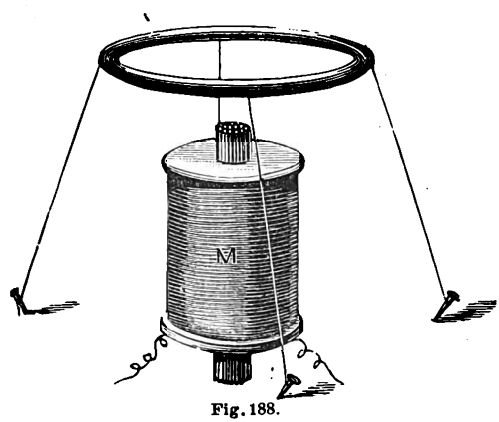


Fig. 188.

Ist ein solcher Kupferring an dünnen, an Nägeln in der Tischplatte endenden Fäden befestigt, so wird er über dem Pole des Elektromagnetes in der Luft schwebend erhalten, wie Fig. 188 andeutet. Diese Wirkungen verschwinden gänzlich, sobald der Ring an irgend einer Stelle quer durchschnitten ist, weil dann die Wirbelströme am Fliessen verhindert werden. Hängt man eine Kupferscheibe an einen Wagebalken über dem Pole eines solchen Elektromagnetes auf und erhält sie durch ein Gegengewicht vor dem Anlassen des Stromes im Gleichgewicht so sieht man,

Digitized by Google

wie sie sich hebt, sobald der Wechselstrom eintritt, weil die in ihr erzeugten Wirbelströme sie abstossen; eine von der Mitte nach dem Rande aufgeschlitzte Scheibe jedoch wird kaum zurückgestossen. Eine kräftige Kupferröhre oder ein Mantel, der über die obere Hälfte eines Elektromagnetes für Wechselstrom gebracht wird, wird mit stetigem Stosse abgetrieben, der ähnlich, nur umgekehrt sich in der Weise geltend macht, wie die Anziehung einer Spule, in der Dauerströme fliessen, auf einen eintauchenden Eisenkern wirkt. Die Wirkung bei Wechselstrom kann durch konische Gestaltung des Elektromagnetes oder des äusseren Kupfermantels verändert werden. Wird ein starker Kupferring auf eine Spule isolirten Kupferdrahtes gelegt, die der Wechselstrom durchläuft, so wird Ersterer um so kräftiger abgestossen, wenn sich in der Spule ein zertheilter Eisenkern befindet. Liegt, wie die Figur 189 darstellt, der Ring nicht

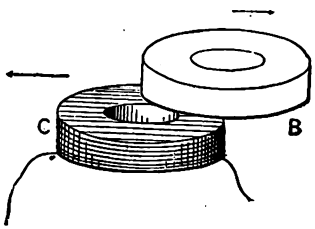


Fig. 189.

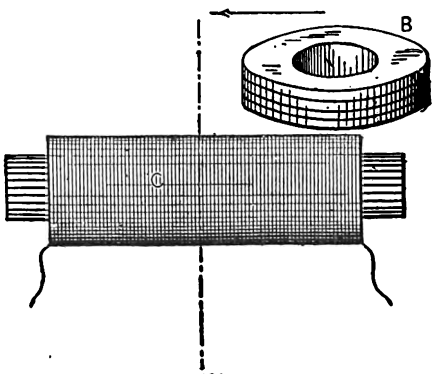


Fig. 190.

concentrisch über der Spule, so erfolgt ebensowohl eine Abstossung in der Richtung der Axe als auch eine seitliche Abstossung, wie die Pfeile in der Figur andeuten. Die Figur 190 veranschaulicht eine ähnliche Wirkung, die man beobachtet, wenn ein kräftiger Kupferring oder eine Scheibe, besser noch eine Säule aus dünnen, aus Kupferblättern ausgestanzten Ringen über einen Pol eines seitlich angeordneten stabförmigen Elektromagnetes gehalten wird, den ein Wechselstrom erregt. Die Wirbelströme in dem Kupferringe suchen den Ring von einer Stelle, an der das wechselnde magnetische Feld am stärksten ist, nach einer Stelle zu treiben, an der es schwächer ist, nämlich nach der mittleren Zone des Elektromagnetes hin.

Digitized by Google

Wenn ferner ein Kupferring oder eine Säule von Kupferblechen drehbar über dem Pole eines Elektromagnetes für Wechselstrom aufgehängt wird (Fig. 191) so wird er aus der parallelen Lage um einen rechten Winkel abgelenkt. Der Ring sucht sich so zu bewegen, dass die Wirbelströme in ihm auf ein Minimum gebracht werden. Dies ist nur eine andere Form des Grundsatzes, dass die Gestalt irgend eines elektromagnetischen Systems das Bestreben hat, so sich zu ändern, dass die Zahl der magnetischen Kraftlinien sich vermehrt. In allen diesen Fällen suchen die Wirbelströme zu entmagnetisiren — sich der Änderung des magnetischen Feldes entgegenzustellen, dem sie selbst ihre Entstehung verdanken. Es herrscht also das Bestreben, die geringste Induction von Wirbelströmen hervorzubringen.

Thomson hat vier Sätze über die Wirkungen aufgestellt, wenn zwei oder mehr geschlossene Leiter in demselben wechselnden Felde beeinflusst werden, oder wenn Eisenmassen in das Feld gebracht werden.

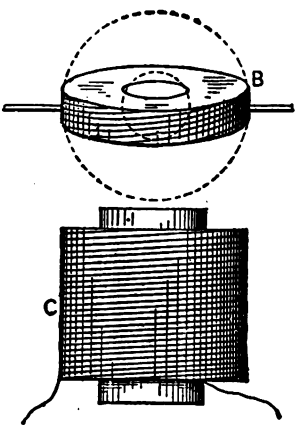


Fig. 191.

„1. Wenn zwei oder mehrere geschlossene Stromkreise in ähnlicher Weise durch Induction von einem wechselnden magnetischen Felde beeinflusst werden, so ziehen sie sich an und suchen sich parallel zu bewegen.

„2. In ein wechselndes Feld gebrachte Eisen- oder Stahlmassen gebenAnlass zur Verschiebung des Magnetismus oder zu seitlich sich bewegenden Kraftlinien und können daher in sich geschlossene Stromkreise in die Richtung solcher Linien bewegen.

„3. Geschlossene Stromkreise in wechselnden magnetischen Feldern oder in Feldern veränderlicher Stärke geben zur Verschiebung des Magnetismus Anlass oder zu Kraftlinien, die sich seitlich zu ihrer eigenen Richtung bewegen und können daher so wirken, dass andere geschlossene Stromkreise sich in der Richtung solcher Linien bewegen.

„4. Eisen- oder Stahlmassen können, wenn sie in ein wechselndes magnetisches Feld gebracht werden, mit anderen Massen oder mit geschlossenen elektrischen Stromkreisen so einwirken, dass sie eine relative Bewegung jener Massen oder Strom-

Digitized by Google

kreise hervorrufen, oder Anlass zu solcher Bewegung ertheilen, wobei die Wirkungen von ständiger Anpassung des sich verschiebenden Magnetismus mit dem zurückbleibenden Magnetismus abhängen."

Eine Folge dieser Zwischenwirkungen ist die unter dem Namen „magnetischer Schirm" bekannte Wirkung. Wird ein Kupferblech in das magnetische Feld zwischen dem Pole eines Elektromagnetes für Wechselstrom und einem Kupferringe (Fig. 185) so eingeführt, dass es einen Theil der magnetischen Linien auffängt, so werden Wirbelströme sowohl im Bleche als auch im Ringe erzeugt; diese Ströme verlaufen mehr oder weniger parallel und wirken sich entgegen. Die Ströme suchen sich gegenseitig zu hemmen. Auch werden sie sich anziehen. Die Gegenwart des zwischenliegenden Bleches bewirkt demnach, dass die Ströme im Ringe gedämpft werden, es wirkt so, als ob die Thätigkeit des Elektromagnetes wie durch einen Schirm abgehalten wird. Zwei Kupferringe in gleicher Lage werden zusammengezogen und gemeinsam vom Elektromagnet abgestossen.

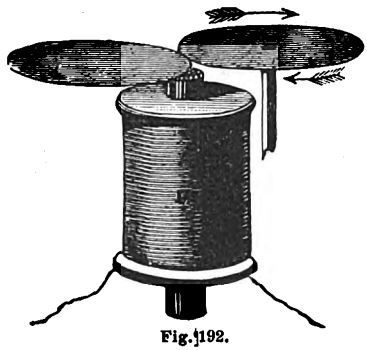


Fig. 192.

Mittels dieser Schirmwirkung kann eine drehende Bewegung hervorgebracht werden, wie Figur 192 darstellt. Eine um ihren Mittelpunkt drehbare Kupferscheibe hält man über den Pol eines Magnetes für Wechselstrom. Darauf schiebt man den Rand einer anderen Scheibe oder eines Kupferbleches so unter die erste Scheibe, dass sie ungefähr den halben Pol bedeckt. Die drehbare Scheibe beginnt sich zu bewegen, die Drehung ist von dem unbeschirmten zu dem beschirmten Theile hin gerichtet. Dies lässt sich durch das Bestreben des Systems erklären, sich selbst in der Weise einzustellen, dass die Wirbelströme ein Minimum werden. Der Theil der sich drehenden Scheibe, in dem die Wirbelströme entstehen, wird beständig nach dem zwischenliegenden Theile der andern Platte, in der die parallelen Wirbelströme fliessen, hingezogen. Eine Reihe sehr seltsamer Versuche ähnlicher Art hat Elihu Thomson angegeben. Bei einem Versuche dreht sich eine hohle Kupferkugel, die zum Theil in Wasser in ein Glasrohr eintaucht, wenn sie

Digitized by Google

über den theilweise geschirmten Pol eines Magnetes für Wechselstrom gehalten wird. Eine andere merkwürdige Anordnung ist in der Figar 193 dargestellt. Hier versetzt eine unsymmetrische Anordnung des magnetischen Feldes in Bezug auf einen Kupferleiter letzteren in Drehung. Der Leiter besteht aus einem cylindrischen Kranze, der auf einer aus Eisenblättern bestehenden Scheibe befestigt ist, der Pol besitzt einen keilförmigen Polschuh Die Drehung tritt gerade so ein, als ob ein Windstoss von dem angespitzten Ende des Elektromagnetes ausginge.

Es gibt jedoch noch eine andere Art, durch einen Magnet für Wechselstrom einen Leiter in Drehung zu versetzen; man umgibt nämlich einen Theil des Elektromagnetkerns — gewöhnlich eine Nase oder Ansatz desselben — mit einer geschlossenen Spule oder einem Kupferring, in dem Wirbelströme inducirt werden, wodurch die Wechsel der magnetischen Polarität in dem hervorragenden Theil sich verzögern. Eine Reihe solcher auf einen hervorspringenden Pol gesetzter Ringe liefern das merkwürdige Ergebniss, dass sie die magnetische Polarität beständig vom Fusse bis zur Spitze des vorspringenden Theils wandern lassen. Wegen weiterer Erläuterung über diesen Gegenstand wird auf das Kapitel über Triebmaschinen verwiesen.

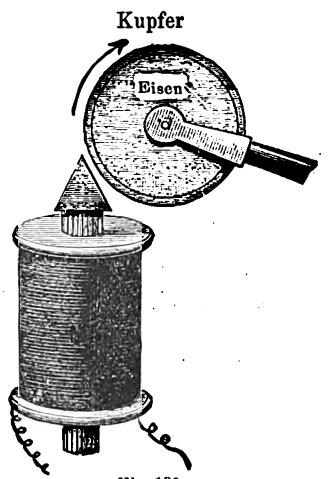


Fig. 193.

Scheinbarer Widerstand. Maxwell's Regel.

Bei Behandlung der Magnete für rasche Wirkung ist im KapitelVII festgestellt worden, das der Elektromagnet selbst die Änderungen des elektrischen Stromes hindert, indem der Magnetismus im Elektromagnet mit einer Art Trägheit gegen den Strom in der Spule wirkt. Diese Wirkung, die zuweilen als Ergebniss der Selbstinduction beschrieben wird, die in Folge der getrennten Spulen der Wickelung, die inducirend auf einander wirken, auftritt, bemerkt man bei der Verwendung von Wechselströmen noch mehr. Die dem Strome durch eine Dynamomaschine ertheilte wechselnde elektromotorische Kraft sucht den Strom im Stromkreise mit hoher Wechselzahl schwingen zu lassen. Bestände der Stromkreis

Digitized by Google

nur aus einem einfachen Widerstande — einem langen, dünnen Drahte (Hin- und Rückleitung) ohne Spulen — so würde der Strom nur von der (wechselnden) Spannung in Volt und vom Widerstand in Ohm abhängen. Sind aber Spulen oder Elektromagnete — überhaupt Leiter mit Selbstinduction — vorhanden, die durch elektromagnetische Trägheit wirken können, so wird der Strom beeinflusst und zu geringerer Stärke gedämpft. Diese Trägheitswirkung der Selbstinduction äussert sich in zweifacher Weise an den Wellen des Wechelstromes; sie vermindert die Amplitude oder Stärke der Wellen, und verzögert sie in der Phase. Thatsächlich hängt die Wirkung von der Wechselzahl als auch von der Selbstinduction des Stromkreises ab. Die Grösse der Selbstinduction eines Stromkreises oder eines Theils davon wird gewöhnlich durch die Einheit der Selbstinduction, Quadrant oder Henry genannt, ausgedrückt.

Die Coefficienten der Selbstinduction von Elektromagneten lassen sich bestimmen. Es ist z. B. auf S. 204 erwähnt, dass der Coefficient der Selbstinduction des Normalrelais der Britischen Telegraphenverwaltung (Form *C*) 26,4 Quadranten beträgt. Das gebräuchliche Symbol für den Coefficienten der Selbstinduction ist *L*. Die Grösse der Wirkung der Selbstinduction eines Elektromagnetes von *L* Quadranten, der in einen Stromkreis eingeschaltet wird, in dem eine wechselnde elektromagnetische Kraft von *n* Perioden in der Secunde herrscht, bestimmt sich durch den Werth $2\pi n L$.

Ist die Grösse $2\pi n L$ für einen Stromkreis bekannt, ebenso auch der Widerstand *R* im Stromkreise, so lässt sich der sog. scheinbare Widerstand berechnen, indem man die Quadratwurzel aus der Summe ihrer Quadrate zieht, oder

$$\text{Scheinbarer Widerstand} = \sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$$

Danach lässt sich die Stromstärke berechnen. Das Ohm'sche Gesetz, das die Grundlage zur Berechnung stetiger Ströme bildet, kann aber nur angewandt werden, wenn es für diesen Fall passend abgeändert ist. Diese Abänderung ist als Regel von Maxwell bekannt; sie wurde im Jahre 1867 angegeben. Sie lautet für den vorliegenden Fall:

$$\text{Maximale Stromstärke} = \frac{\text{Maximale elektromotorische Kraft}}{\text{Scheinbarer Widerstand}}$$

Digitized by Google

oder

$$\text{Mittlere}^{1}) \text{ Stromstärke} = \frac{\text{Mittlere elektromotorische Kraft}}{\text{Scheinbarer Widerstand}^{2})}$$

Keiner der beiden Ausdrücke des Gesetzes ist vollständig, weil keiner von beiden uns etwas über die verzögernde Wirkung der Selbstinduction angibt, in Folge deren das Maximum der Stromstärke hinter dem Maximum der aufgewendeten elektromotorischen Kraft zurückbleibt. Vergleicht man eine volle Periode oder einen Kreislauf von Wechseln mit der Umdrehung eines Punktes um einen Kreis, so kann man die Grösse der Verzögerung der Phase als Werth einer Winkelverzögerung ausdrücken. Der Buchstabe φ wird gewöhnlich für den Verzögerungswinkel benutzt. Der Werth von φ ist stets ein solcher, dass sein cosinus das Verhältniss zwischen Widerstand und scheinbarem Widerstand darstellt. Maxwells Regel lautet daher auch:

$$\text{Mittlere Stromstärke} = \frac{\text{mittlere elektromotor. Kraft}}{\text{Widerstand}} \times \cos \text{ der Verzögerung.}$$

Hieraus ergibt sich, dass die mittlere Stromstärke immer geringer ist, als sie nach Ohms Gesetz sein würde, wenn die elektromotorische Kraft stetig statt wechselnd wäre. Ist der Werth $2\pi nL$ sehr gross im Vergleich zum Widerstande, so wird der scheinbare Widerstand praktisch allein durch die Wirkung der Selbstinduction hervorgerufen, die Verzögerung wird so sein, dass cos φ nahezu gleich 0 ist, oder mit anderen Worten, die Stromstärke wird keineswegs vom Widerstande des Stromkreises, sondern nur von der Selbstinduction abhängen, die Verzögerung der Phase wird 90° oder ein Viertel der ganzen Periode betragen.

Ein gut zertheilter Elektromagnet bietet wegen seiner grossen Selbstinduction daher einen erheblichen scheinbaren Widerstand bei Einwirkung eines Wechselstromes mit hoher Wechselzahl. Solche Elektromagnete werden jetzt häufig als hemmende Wickelungen in Wechselstromkreisen zur Dämpfung der Ströme benutzt. Sie wirken zweckmässiger als ein Draht von hohem Widerstande, weil die Selbstinduction nicht wie Widerstand Energie verbraucht.

1) Mittlere oder virtuelle Stromstärke bezeichnet die Quadratwurzel aus dem mittleren Quadrat der Werthe, nicht ihr arithmetisches oder geometrisches Mittel. Die obigen Formeln nehmen an, dass die Wechsel einer Sinusfunktion folgen.

2) Einige Schriftsteller nennen den scheinbaren Widerstand den wirksamen Widerstand des Stromkreises.

Digitized by Google

Zur Bestimmung der Grösse oder geeigneten Wickelung der Elektromagnete für Wechselstrom, die irgend eine gewünschte Wirkung hervorbringen sollen, ist bis jetzt sehr wenig geschehen. Es scheint die Ansicht weit verbreitet zu sein, dass ein (geblätterter) Elektromagnet, der mittels Wechselstrom betrieben wird, eine viel geringere Wirkung hervorbringt, als wenn der Elektromagnet mit Gleichstrom derselben Stärke, wie man solche mittels eines Elektrodynamometers oder eines andern geeigneten Strommessers messen kann, betrieben wird. Diese Ansicht ist nicht begründet. Ohne Zweifel hat der durch die Selbstinduction der Wickelungen beim Wechselstrombetriebe hervorgerufene scheinbare Widerstand zur Folge, dass die Erzielung der geeigneten Stromstärke nur durch Anwendung einer höheren Spannung der Wechselströme möglich ist, als solche bei Gleichstrom nothwendig wäre.

Der Verfasser fand z. B., dass ein bestimmter geblätterter Elektromagnet, der eine Spannung von 16 Volt erforderte, um die erregende Stromstärke auf 8 Am. zu bringen, eine Spannung von 1150 Volt nothwendig machte, um einen Wechselstrom von 8 Am. zu zeigen. Wurde diese hohe Spannung angewendet, so brachte der Wechselstrom von 8 Am. fast die gleiche Wirkung hervor, wie der Gleichstrom von derselben Stärke. Es ist wohl zu beachten, dass bei derselben virtuellen Stromstärke, der maximale Werth der Stärke des Wechselstromes etwa 40 % mehr beträgt, als die Stärke des Gleichstromes von demselben nominalen Werth (gemessen mittels eines Elektrodynamometers). Es folgt daraus, dass die resultirende Magnetisirung des Kernes — falls die Durchlässigkeit gleich bleibt — einen ähnlichen maximalen Werth erreicht. Da ferner die Tragkraft auch mit dem Quadrate der Magnetisirung sich ändert, so folgt, dass die Wirkung des Elektromagnetes sich für beide Stromarten fast gleich stellt. Jedoch ist die Durchlässigkeit des Eisens für die höheren Grade der Magnetisirung geringer, und wenn diese auf über 6000 oder 7000 Linien für das Quadratcentimeter steigen, so wird die resultirende Wirkung bei Wechselstrom etwas geringer als bei Gleichstrom sein.

Es wird noch vieler Versuche in der gedachten Richtung bedürfen, gerade jetzt, wo die Verwendung des Wechselstromes so weit sich ausbreitet.

Bei der Betrachtung des Gegenstandes muss man stets im Auge behalten, dass bei den gewöhnlich zu Betriebszwecken

Digitized by Google

benutzten Wechselströmen mit Wechselzahlen von 40 bis 120 Perioden in der Sekunde die in der Wickelung eines Elektromagnetes fliessende Strommenge mehr durch die Selbstinducti n als durch den Widerstand bestimmt ist. In solchen Fällen ist das Gesetz von Ohm durch das Gesetz von Maxwell für periodische Ströme zu ersetzen. Bei Elektromagneten von solcher Grösse, wie sie häufig in der Technik benutzt werden, darf man den Widerstand als verschwindend klein im Verhältniss zur Wirkung der Selbstinduction ansehen. Bedeutet n die Periodenzahl in der Secunde und L den Coefficienten der Selbstinduction, so ergibt sich die Wirkung zu $2\pi n L$ und man darf setzen:

oder
$$i = \frac{V}{2\pi n L}$$

$$\text{Virtuelle}^{1}) \text{ Stromstärke} = \frac{\text{Virtuelle Spannung}}{\text{Wirkung der Selbstinduction}}$$

Zusatz: Unter Wirkung der Selbstinduction ist ein Werth zu verstehen, der den Widerstand der Wickelung scheinbar vergrössert. Wie auf Seite 306 erwähnt wurde, beträgt der scheinbare Widerstand

$$\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$$

Ist R verschwindend klein gegen $2\pi n L$, so beträgt der Werth des durch die Selbstinduction bedingten Widerstandes $2\pi n L$. Dieser Werth wird von englischen Technikern mit dem Worte „inductance“ bezeichnet. In der deutschen Sprache gibt es dafür keinen passenden einfachen Ausdruck, es wurde daher die Bezeichnung „Wirkung der Selbstinduction“ gewählt. Genauer könnte man sagen: „Widerstandswirkung der Selbstinduction“. —

Für die Praxis besteht die Schwierigkeit, bei gegebener Grösse des Kernes und bestimmter Windungszahl den Betrag der Widerstandswirkung der Selbstinduction zu bestimmen.

Die nachstehende Betrachtung hierüber ist vielleicht von Nutzen. Der Coefficient L der Selbstinduction eines elektromagnetischen Kreises wird gebildet durch das Product der Anzahl der Windungen, von denen die magnetische Strömung eingeschlossen wird mit der Zahl der Linien der Strömung, unter der Voraussetzung, dass die Stromstärke eine absolute Einheit (= 10 Am.) beträgt. Oder wenn S die Windungszahl bedeutet, so ist L (in CGS Einheiten) gleich $4\pi S^2$ dividirt durch die Summe der magne-

1) Wegen des Ausdruckes „virtuell“ siehe Seite 307. Anmerk. 2.

Digitized by Google

tischen Widerstände des magnetischen Kreises. Ist nun der magnetische Kreis geschlossen, l *cm* lang und besitzt einen Querschnitt von A *qcm*, beträgt der Werth der Durchlässigkeit μ, so ist der gesammte magnetische Widerstand gleich $l/A\mu$. Da die praktische Einheit der Selbstinduction (Quadrant oder Henry) = 10^9 *CGS* Einheiten beträgt, so wird der Werth von L ausgedrückt durch die Formel

$$L = 4\pi A \mu S^2 / 10^9 l$$

Ist der Querschnitt überall gleichmässig und bedeutet v den kubischen Inhalt in *ccm*, so ist

$$L = 4\pi v \mu S^2 / 10^9 l^2$$

Wird das spez. Gewicht des Eisen zu 7,79 angenommen und beträgt das Gewicht der eisernen Kerne, des Joches und des Ankers zusammen m Gramm, so ist

$$L = m \mu S^2 / 620\,000\,000\, l^2$$

Bei Magneten für Wechselstrom, wie solche z. B. für die Kerne von Umsetzungsapparaten und Wechselstrommaschinen benutzt werden, ist es nicht zweckmässig, wenn man die durchschnittliche Magnetisirung über 6000 Linien für das *qcm* steigert, weil die Erhitzung durch Hysteresis eintritt. Geht man mit der Magnetisirung nicht über diese Grenze hinaus, so darf die Durchlässigkeit des weichen Eisens zu 2000 angenommen werden. (In diesem Falle würde die Tragkraft des Kernes 1,5 *kg* auf das *qcm* Polfläche nicht übersteigen).

Unter diesen Voraussetzungen ist

$$L = m S^2 / 310\,000\, l^2$$

Liegt der Anker nicht an, so ist der magnetische Widerstand viel grösser, weil die geringe Durchlässigkeit der Luft in den Zwischenräumen einwirkt, der Werth L wird deshalb kleiner. Der oben angegebene Werth ist daher nur anwendbar, wenn es sich um Fälle handelt, in denen der Anker gegen die Pole anliegt.

Als Beispiel möge Folgendes dienen Ein hufeisenförmiger Elektromagnet aus geblättertem Eisen besitze überall einen Querschnitt von 1 *qcm* und eine gesammte Länge von 20 *cm*. Er wiege einschl. des Ankers 176 *g*, sei mit 1000 Drahtwindungen belegt, die, wenn der Anker anliegt, einen Coefficienten L der Selbstinduction im Werthe von etwa 1,4 Quadranten (oder Henry) besitzen. Bei 100 Perioden in der Sekunde betrage die Widerstandswirkung der Selbstinduction etwa 890 Ohm. Die Länge des Drahtes sei nur 50 *m* und der wirkliche Widerstand nicht

Digitized by Google

höher als 1,5 Ohm. Ersetzt man den Draht durch solchen von doppeltem Querschnitt, aber von gleichem Gewicht wie vorher, sodass die Hälfte der Windungen sich ergibt, so wird der Widerstand auf den vierten Theil des früheren Werthes herabgedrückt, die Widerstandswirkung der Selbstinduction wird also ebenfalls auf $^1/_4$ sinken. Würde man nun die Spannung des Wechselstromes auf die Hälfte vermindern, so verdoppelt sich die Stromstärke, aber die Ampère-Windungen und deshalb auch die Magnetisirung bleiben ungeändert. Wir sehen demnach, dass für eine Wickelung von gegebenem Gewicht (oder Masse) auf einem gegebenen Kern die Spannung des Wechselstromes, die zur Erlangung einer gleichen gegebenen Magnetisirnng anzuwenden ist, sich gerade proportional mit der Windungszahl ändert. Sie muss sich auch in geradem Verhältniss zur Wechselzahl ändern. Es sei z. B. ein Elektromagnet für eine Stromstärke von 5 Am. bei 100 Volt und 40 Perioden in der Sekunde bestimmt, so wird dieser Magnet in einem Stromkreise von 100 Perioden keine 5 Am. erhalten, wenn nicht die Spannung auf 250 Volt steigt. Bedeutet m_1 die Masse (in Grammen) des Eisenkernes, m_2 die Masse der Kupferwickelung, l_1 die mittlere Länge des magnetischen Kreises, l_2 die mittlere Länge einer Kupferwickelung und n die Anzahl der Perioden in der Sekunde, so stellt sich das Verhältniss der Zahl Volt V_w für Wechselstrom zur Zahl Volt V_g bei Gleichstrom, wenn in beiden Fällen gleiche magnetisirende Ströme hervorgebracht werden sollen, in Annäherung auf:

$$\frac{V_w}{V_g} = \frac{1{,}45\, n\, m_1\, m_2}{l_1^2\, l_2^2}$$

Ist der Kern nicht gut geblättert, oder die Hülse nicht geschlitzt, so werden Wirbelströme erregt, die dem erregenden Strom entgegen zu wirken suchen. Bei jeder gegebenen Spannung wird die Magnetisirung durch die Wirbelströme nicht vermindert, da sie aber die wirksame Selbstinduction vermindern, so entsteht ein stärkerer Strom, dadurch Neigung zur Überhitzung und Energieverlust.

Elektromagnete für Heizzwecke.

Die schnellen Wechsel des Magnetismus im magnetischen Felde eines durch Wechselströme erregten Elektromagnetes erzeugen Wirbelströme in jedem ungetheilten Metallstücke seines Bereichs. Alle Rahmen, Hülsen, Hülsenenden u. dgl. müssen sorgfältig auf-

Digitized by Google

geschlitzt sein, andernfalls überhitzen sie sich. Wird ein gewöhnliches Plätteisen auf die Spitze der Pole eines geeignet zertheilten Elektromagnetes gesetzt, auf den Wechselströme einwirken, so wird es rasch durch die in ihm erzeugten Wirbelströme erhitzt.

Diese Eigenschaft benutzend, schlägt Rankin Kennedy vor, besondere Formen von Elektromagneten als Heizapparate zu benutzen. In ihnen soll das Umsetzungsprincip, starke Ströme von niedriger Spannung durch Umformung schwacher Ströme mit hoher Spannung zu erlangen, zur Geltung kommen. Sein Elektromagnet zum Erhitzen von Plätteisen, Kupferkesseln, Theekannen u. s. w.

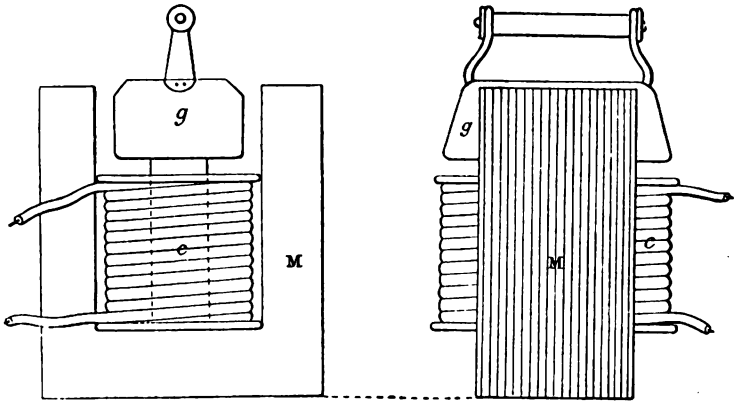


Fig. 194.

besitzt eine dreipolige Form und ist aus ausgestanzten, ausgeglühten Eisenblättern hergestellt (Fig. 194). Die Erregerwickelung liegt auf dem mittleren Schenkel, der breiter und kürzer als die beiden andern ist. Auf die Spitze des mittleren Schenkels setzt man den zu erhitzenden Gegenstand. Wenn die erregende Wickelung aus 200 Windungen besteht und von einem Wechselstrom von 20 Ampère durchflossen wird, so ergibt dies 4000 Ampère-Windungen. Nach dem Princip der Umsetzung ist das als secundäre Wickelung wirkende Metallstück nur als eine Windung zu rechnen, so dass der Strom es rasch erwärmen wird.

Digitized by Google

Kapitel XII.

Elektromagnetische Triebmaschinen.

Ungefähr vom Jahre 1830 ab war es für diejenigen, die mit Elektromagneten arbeiteten, klar, dass man durch passende Verbindung von Elektromagneten und Ankern Bewegungskraft mittels der von einer Batterie gelieferten elektrischen Energie würde erzeugen können. Früheren Datums allerdings war der Apparat von Faraday zur Bewegung eines Magnetes um einen stromführenden Kupferdraht, ebenso das umlaufende Rad von Barlow und die Scheibe von Sturgeon. Unter denen, die zu jener Zeit den Bau elektromagnetischer Triebmaschinen vorschlugen, befanden sich Henry[1]), Dal Negro[2]) und Ritchie[3]). Die Maschinen von Henry und Dal Negro besassen schwingende Theile; der bewegliche Theil musste abwechselnd hin und herschwingen. Ritchie's Maschine führte eine umlaufende Bewegung aus, sie war das Urbild der neueren Maschine mit festliegendem Feldmagnet und umlaufendem Anker. Figur 195 stellte eine Form der Maschine von Ritchie dar, wie sie von Daniel Davies aus Boston gebaut wurde. Der Feldmagnet besteht aus einem Hufeisen von Stahl und ist ungefähr 22 *cm* hoch. Zwischen seinen

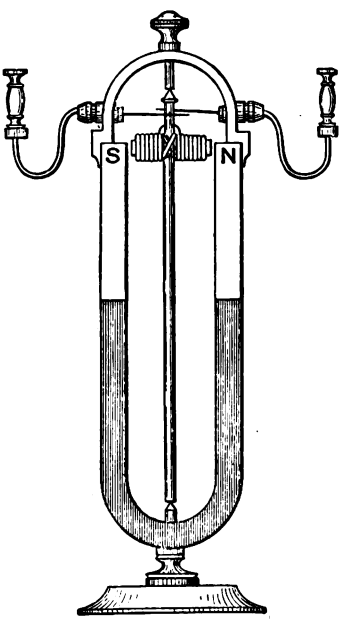


Fig. 195.

1) Sillimans Journal S. 340 1831; siehe auch Henry, Wissenschaftliche Schriften (1886) Bd. I S. 64.

2) Ann. R. Lomb. Venet. April 1834; siehe auch Lumière Electrique IX S. 40 1883.

3) Phil. Trans. 318 (2) 1833.

Digitized by Google

Polen befindet sich der drehbare Anker, aus einer Kupferwickelung bestehend, die auf einem Eisenkern aufgewunden ist und deren Enden an zwei auf dem Schafte sitzenden Contactstücken aus Silber befestigt sind. Die Contactstücke dienen als Stromwender. Dieser Apparat wird auf S. 212 in dem Werke von Davis „Magnetismus“ (Ausgabe von 1852) als ein „sich drehender Elektromagnet“ und als Triebmaschine beschrieben, aber auf S. 268 ist derselbe Apparat wieder so dargestellt, dass mit der Hand die Axe mechanisch gedreht wird, während der Apparat als Stromerzeuger wirkt. Dabei findet sich die Bemerkung: „Irgend ein elektromagnetischer Apparat, mittels dessen Bewegung durch gegenseitige Wirkung eines galvanischen Stromes und eines Stahlmagnetes hervorgebracht wird, kann so eingerichtet werden, dass er einen magnetelektrischen Strom liefert, wenn die Bewegung mechanisch erfolgt“. Der Gedanke der Umkehrbarkeit der Eigenschaft der Bewegung und Stromerzeugung ist noch klarer durch Walenn im Jahre 1860 ausgedrückt worden. Auf Ritchie's Maschine folgte im Jahre 1834 die Maschine von Jacobi. In dieser Maschine bestand der Feldmagnet aus einer vielpoligen Vereinigung zweier Polkränze, zwischen denen ein zusammengesetzter Anker sich drehte. Die Maschine war zum Betriebe eines Bootes bestimmt, mit dem Jacobi im Jahre 1838 die Newa befuhr. Der Strom, der die umlaufenden Magnete umfloss, wurde regelmässig in dem Augenblicke umgekehrt, wenn die Magnete zwischen den Polen der festliegenden Magnete durchgingen. Die Umkehrung erfolgte durch einen Stromwender, der aus vier gezahnten Messingrädern bestand, zwischen deren Zähnen Elfenbein- oder Holzstücke eingelegt waren. (Fig. 196).

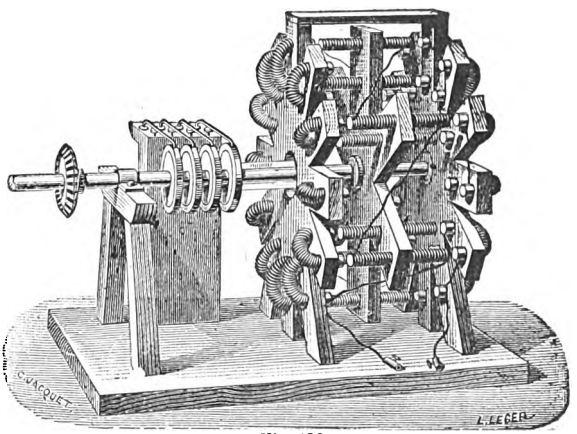


Fig. 196.

Zwei ältere amerikanische Erfinder von Triebmaschinen, Davenport und Page, verdienen mehr als eine oberflächliche

Digitized by Google

Erwähnung. Die Maschine von Davenport[1]) greift in gewisser Beziehung den mehr vervollkommneten Entwürfen von Froment voraus. Page[2]), der vor nahezu 20 Jahren mit diesem Gegenstande sich weiter beschäftigte, schuf eine bestimmte Form elektromagnetischer Maschinen, die sich auf der Benutzung einer Wickelung mit eintauchendem Magnet anstatt eines gewöhnlichen Elektromagnetes mit festliegendem Kern gründete. Eine Form seiner Maschine mit doppeltem Balancier ist in der Figur 197 dargestellt. Bei einem seiner Versuche benutzte Page eine Spiralwickelung von 30 *cm* Durchmesser und war im Stande, einen Eisenkern von 136 *kg* 25 *cm* hoch zu heben. Bei einem andern Versuche wurde ein Eisenkern im Gewichte von 240 *kg* mit einer angehängten Last von 230 *kg*, im Ganzen nahe eine halbe Tonne 25 *cm*

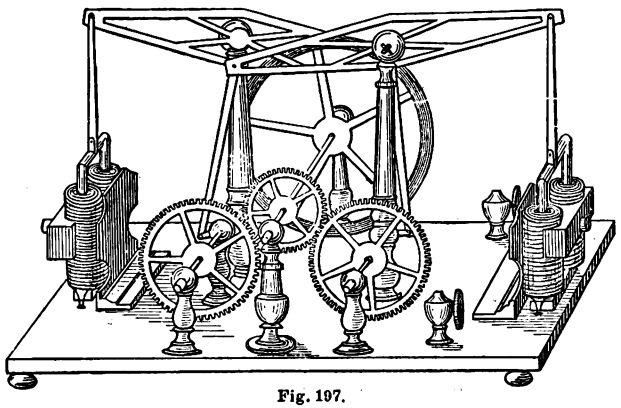


Fig. 197.

hoch gehoben. Page brachte es zu Stande, seine Maschine wirkliche Arbeit ausführen zu lassen, z. B. eine Drehbank zu treiben. Die Kosten zur Gewinnung der elektrischen Energie aus Primärbatterien waren jedoch ein Hinderniss für die Verwendung dieser Maschinen. Andere Erfinder brachten neue Formen hervor. In England war Wheatstone[3]), dessen Einrichtung, Drehung durch schräge Annäherung zu erreichen, früher bereits erwähnt worden ist (s. S. 251), in der Herstellung neuer Formen sehr thätig. Hjörth[4]), der zuerst in Tipton, später in Liverpool arbeitete,

1) Annals of Electricity Bd. II 1838.

2) Silliman's Journal XXXIII. 1838 und (2) X. 344 und 473, 1850; und XI. 86, 1851.

3) Siehe Specif. of. Patent 9022 von 1841.

4) Siehe Specif. of. Patent 12295 von 1848 und 2198 von 1854.

Digitized by Google

stellte sowohl Stromerzeuger als Triebmaschinen her, für die er eine goldene Medaille auf der grossen Weltausstellung im Jahre 1851 erhielt. In Holland baute Elias eine Triebmaschine, in der Feldmagnet und Anker aus Elektromagneten in Ringform bestanden. Sie waren so bewickelt, dass sie mehrere Folgepole hatten. In Frankreich wurde Froment[1]) mit zahlreichen Formen bahnbrechend. In der am besten bekannten Maschine sind auf dem Umfange eines sich drehenden Rades eine Anzahl Eisenstücke befestigt (Fig. 198), die seitlich gegen die Pole eines Elektromagnetes angezogen werden, indem der Strom selbstthätig ausgeschaltet wird, wenn der herankommende Anker die geringste Entfernung erreicht. Solche Maschinen, einige mit vielpoligen Elektromagneten benutzte Froment viele Jahre hindurch zum Betriebe von Theilmaschinen und anderen kleinen Maschinen in seiner Apparatwerkstatt zu Paris. Ein anderer französischer Mechaniker Bourbouze baute Maschinen von der in der Figur 199 dargestellten Art nach den Entwürfen von Breton. Diese Maschine gründete sich auf die von Page erfundene Anordnung, zeigt jedoch einige Abänderungen. Eine abgeschlossene Spule mit eintauchendem Kern (s. S. 236) ersetzt die einfache Spule und den eintauchenden

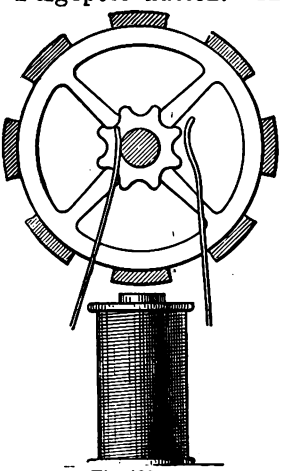


Fig. 198.

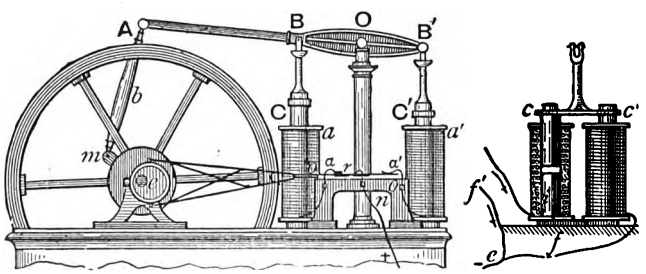


Fig. 199.

Kern. Der Stromwender, der dem Schieberventil der Dampfmaschine ähnlich ist, wird durch das Excenter an der Kurbelwelle in Bewegung gesetzt.

Eine andere französische Maschine, die einen Preis auf der

1) L' Institut LXXXII. December 1884, siehe auch La Lumière Electrique IX. 194. 1883.

Digitized by Google

Pariser Ausstellung von 1856 erhielt, wurde durch Roux entworfen. Hierbei (Fig. 200) wurde der Elektromagnet von Froment (Fig. 130) verwendet. Die Elektromagnete besassen einen Eisenmantel; ein Eisenblech war um die Aussenseite der Wickelung gelegt.

Im Jahre 1864 stellte Pacinotti[1]) die erste Maschine mit Ringanker, den Vorläufer der neueren Maschinen her. Die Ringform wurde unabhängig von Neuem durch Gramme[2]) im Jahre 1870 erfunden mit der Abänderung, dass der Kupferdraht über den ganzen Umfang des Ringes gewickelt wurde. Seit jener Zeit ist der Entwurf von Triebmaschinen nur ein Theil der Lehre von den dynamoelektrischen Maschinen geworden. Es ist seltsam, dass der grosse Fortschritt im Entwurf und Bau von elektrischen Triebmaschinen von Erfindern ausging, die nicht danach strebten, eine Triebmaschine zu erfinden, sondern die bei der Vervollkommnung der Dynamomaschinen zur Erzeugung elektrischen Lichtes sich nunmehr im Besitze einer weit besseren elektrischen

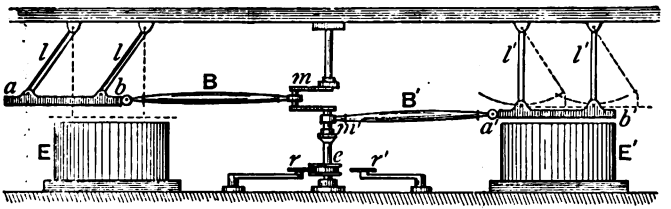


Fig. 200.

Triebmaschine sahen, als jemals eine solche besonders hergestellt worden war.

Die neueren elektrischen Triebmaschinen kann man in zwei Klassen eintheilen — solche, die mit Gleichstrom und solche, die mit Wechselstrom betrieben werden. In jedem Falle besteht die Maschine aus zwei Theilen — einem Feldmagnet und einem Anker; — den Unterschied zwischen beiden erkennt man daran, dass in dem als Feldmagnet bezeichneten Theile der Magnetismus gleichbleibend (oder nahezu gleichbleibend) ist, wogegen in dem als Anker bezeichneten Theile der Magnetismus während des Umlaufes der Maschine beständig sich umkehrt.

In Gleichstrommaschinen besteht der Feldmagnet gewöhnlich aus einem feststehenden massiven Elektromagnet einfacher Form,

1) Nuovo Cimento XIX. 378, 165.

2) Comptes Rendus LXXIII S. 175, 1871 und Specif. of. Patent 1668 von 1870.

Digitized by Google

zwischen dessen Polen der Anker sich dreht. Der Letztere ist in der Regel ein zusammengesetzter Magnet, der symmetrisch um die Achse angeordnet ist, einen Kern von geblättertem Eisen (gewöhnlich in Ring- oder Trommelform) besitzt, mit einem besonders gewundenen System isolirter Kupferdrähte bedeckt ist, durch die der Strom in einer durch einen Stromwender geregelten Weise fliesst. Figur 201 veranschaulicht eine neuere Form der elektromagnetischen Triebmaschine mit Trommelanker, der zwischen den Polen eines Feldmagnetes mit doppeltem magnetischen Kreise liegt. Es ist dies eine gedrängte und wirksame Form.

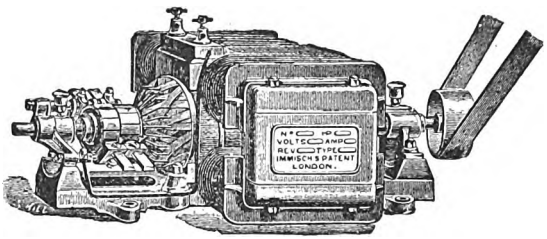


Fig. 201.

Zum Betriebe mit Wechselstrom wird eine andere Bauart angewandt. Der Feldmagnet ist gewöhnlich vielpolig; eine gewöhnliche Form ist der in Figur 202 angedeuteten ähnlich und besteht aus zwei gegenüberstehenden Polkränzen, deren Pole abwechselnde und entgegengesetzte Polarität erhalten. In dem Zwischenraum zwischen den beiden Polkränzen dreht sich der Anker, der bei dieser Maschinenklasse gewöhnlich keinen Eisenkern enthält, sondern aus einem Satz von Kupferwickelungen besteht. Die Anzahl der Spulen ist der Zahl der auf dem Umfange sitzenden Pole gleich; sie sind abwechselnd in rechts und links laufenden Spiralen gewickelt. Triebmaschinen für Wechselstrom dieser Art besitzen zwei wichtige Eigenthümlichkeiten: 1) sie laufen nicht von selbst an, sondern bedürfen bis zur Erlangung ihrer eigentlichen Geschwindigkeit eines Hülfsantriebes; 2) sie laufen, wenn sie so in Gang gekommen sind, bei jeder Belastung synchron mit den Stromwechseln und daher auch mit

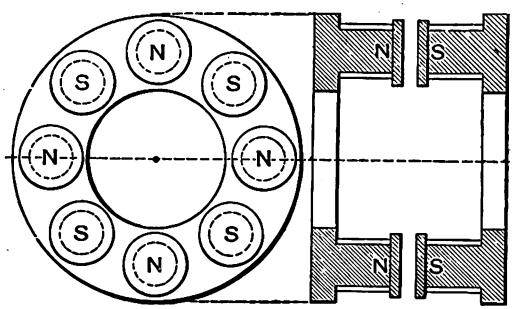


Fig. 202.

Digitized by Google

der Maschine, die den Strom auf der Erzeugungsstation hervorbringt. Eine wichtige Verbesserung hat Mordey eingeführt, der an Stelle des zusammengesetzten Feldmagnetes mit besonderen Wickelungen auf jedem hervortretenden Pol eine einfachere Form (Fig. 203) mit nur einer Wickelung setzt. Das vielfache magnetische Feld wird dadurch erzeugt, dass an den Enden des cylindrischen Kernes zwei massive Polstücke mit vorstehenden, beinahe zusammentreffenden Vorsprüngen befestigt werden. Bei dieser besonderen Maschine dreht sich der Feldmagnet; die Ankerwickelungen befinden sich auf einem feststehenden Rahmen.

Eine sehr zierliche Wechselstrommaschine zum Betriebe elektrischer Uhren ist von Grau-Wagner[1]) erfunden; sie besitzt einen polarisirten, sich drehenden Anker mit schräg geformten Polflächen.

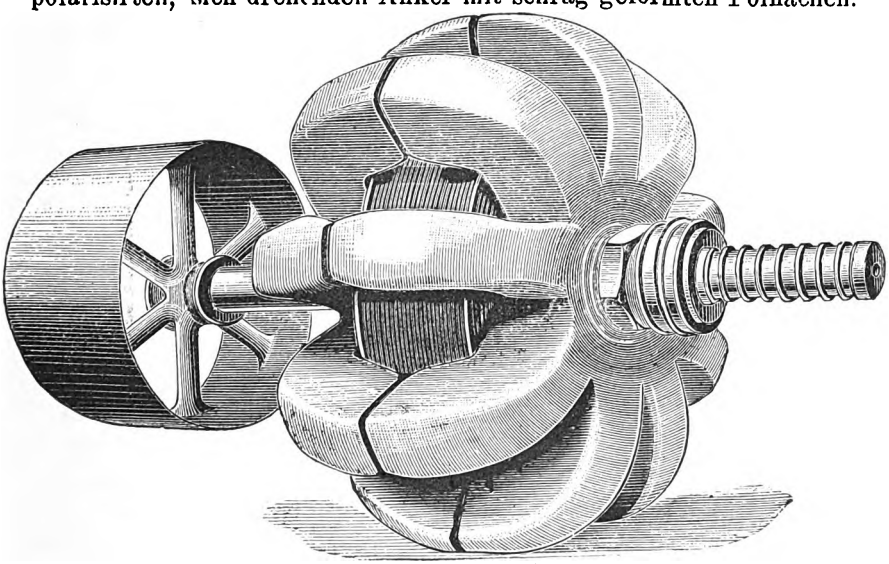


Fig. 203.

Andere Triebmaschinen für Wechselstrom sind von Ferraris, Tesla, Elihu Thomson und Andern erfunden worden; sie beruhen auf den Wechselwirkungen von Wickelungen, in denen Wechselströme von verschiedener Phase fliessen Sie im Einzelnen zu beschreiben, würde über den Rahmen dieses Werkes hinausgehen. Weiteren Aufschluss über elektrische Triebmaschinen, die Theorie der elektrischen Kraftübertragung und Ausnutzung findet man in dem Werke des Verfassers „Die Dynamoelektrischen Maschinen“[2]).

1) Zeitschrift für Elektrotechnik Bd. IV S. 1.

2) Die Dynamoelektrischen Maschinen von S. P. Thompson. Deutsch von Grawinkel. Halle, bei W. Knapp.

Digitized by Google

Kapitel XIII.

Elektromagnetische Werkzeugmaschinen und verschiedene Anwendungen der Elektromagnete.

Viele Jahre sind verflossen, seit Froment seine elektromagnetischen Maschinen zum Betriebe verschiedener leichter Werkzeuge, Uhrmacherdrehbanken, Theilmaschinen und dergleichen in seiner Werkstatt in Paris verwendete. Bis zur heutigen Zeit ist nur wenig zur Entwickelung der Anwendung elektrischer Triebmaschinen als Werkzeugmaschinen geschehen. Es gibt allerdings viele Werkstätten und Fabriken in solchen Städten, in denen öffentliche Elektricitätswerke bestehen, besonders in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, wo elektrische Triebmaschinen an Stelle von Dampfmaschinen vielfach verwendet werden. Man findet jedoch keine besondere Anpassung im Hinblick auf diejenigen Eigenschaften, die elektrische Triebmaschinen von anderen Maschinen unterscheiden.

Die sehr hohe Geschwindigkeit und Leichtigkeit, die man den beweglichen Theilen einer elektrischen Triebmaschine geben kann, machen sie für besondere Zwecke sehr geeignet. Vor vielen Jahren wurden elektromagnetische Triebmaschinen zu Bohrern für Zahnärzte benutzt. Trouvé in Paris erfand besonders Anwendungen dieser Art. In den Vereinigten Staaten von Nordamerika sind zahnärztliche elektrische Werkzeuge weit verbreitet. Kleine selbstbewegliche, mit der Hand zu haltende Hämmer, die eine Menge schwacher Schläge liefern, hat man zum Einsetzen von Plomben in hohle Zähne sehr geeignet gefunden.

Angaben über die Anwendung des Elektromagnetes in der Zahnheilkunde findet man in den Berichten der Preisrichter der zu Philadelphia im Jahre 1884 abgehaltenen elektrischen Ausstellung.

Bei einer anderen Art, elektromagnetische Kraft für Werkzeuge zu benutzen, wird ein beweglicher oder eintauchender

Digitized by Google

Kern und eine in Abtheilungen gewickelte Spule verwendet. Wird ein Strom an irgend einem Punkte in eine solche Wickelung geleitet, so fliesst er von jenem Punkte auf beiden Wegen durch die Wickelung und bringt an dem Punkte einen Folgepol hervor. Nach solchem Polpunkt in der röhrenförmigen Spule wird das Ende des inneren Eisenkernes geführt. Wenn nun die Stelle, wo der Strom zugeführt wird, beständig verschoben wird, indem man die Berührungsstelle mit dem Stromkreise durch einen besonderen Stromabgeber längs den Windungen der Spule gleiten lässt, so wird der Kern zu jedem gewünschten Punkt längs der Spule gezogen. Nach diesem Plan bauten Page und Du Moncel Maschinen; im Jahre 1880 stellte Marcel Deprez hiernach seinen elektromagnetischen Hammer[1]) (Fig. 204) her. Die Spule AB besteht aus 80 Abtheilungen oder gesonderten Wickelungen, die alle mit einander zu einer langen Wickelung verbunden und mit einer Abzweigung versehen sind, welche die Verbindung des Endes jeder Abtheilung und den Anfang der folgenden zu einem Stabe des Stromabgebers FG hinabführt. Gegen den Stromabgeber liegen zwei Federn an, die an einem Handgriff HI befestigt sind. Die Entfernung, bis zu der der Kern bewegt wird, hängt von der dem Handgriff gegebenen Lage ab. Der Eisenkern wiegt 23 *kg*, seinem Gewicht kann eine lebendige Kraft von 70 *kg* hinzugefügt werden, wenn ein Strom von 43 Ampère durch 15 Abschnitte fliesst.

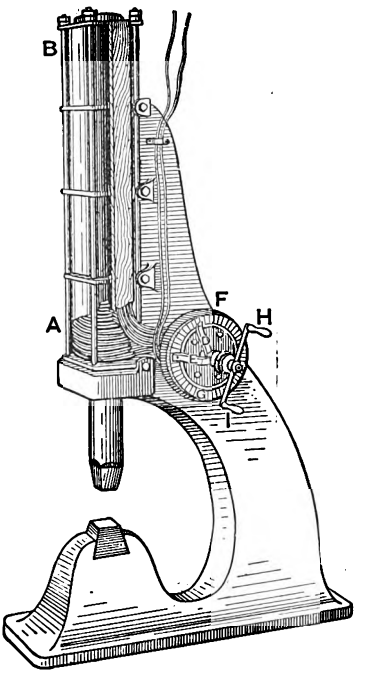


Fig. 204.

In der elektrischen Ausstellung im Crystallpalast in Sydenham im Jahre 1882 befanden sich einige auf das Schiffsrettungswesen bezügliche elektromagnetische Einrichtungen; Erfindungen von Latimer Clark. Bei einer sollte ein Taucher, während er ein gesunkenes eisernes Schiff in Stand setzt oder seine

1) La Lumière Electrique IX. 44. 1883.

Digitized by Google

Hebung vorbereitet, einen Elektromagnet verwenden. Diesen Elektromagnet sollte man in jede gewünschte Tiefe senken können; bewegliche Kabel sollten ihn mit einer starken Stromquelle verbinden. Der mit dem Elektromagnet in die Tiefe sinkende, mit einer Schaltvorrichtung ausgerüstete Taucher konnte in jedem Augenblick den Elektromagnet erregen und dadurch seine Anhaftung an den Eisenrumpf herbeiführen. Er erhielt dadurch einen Sitz oder festen Punkt, von dem aus sich die Arbeit beginnen lässt; z. B. Löcher in die Eisenplatten bohren. Eine zum Betriebe des Bohrers bestimmte elektrische Triebmaschine war bei dieser Einrichtung ebenfalls vorgesehen.

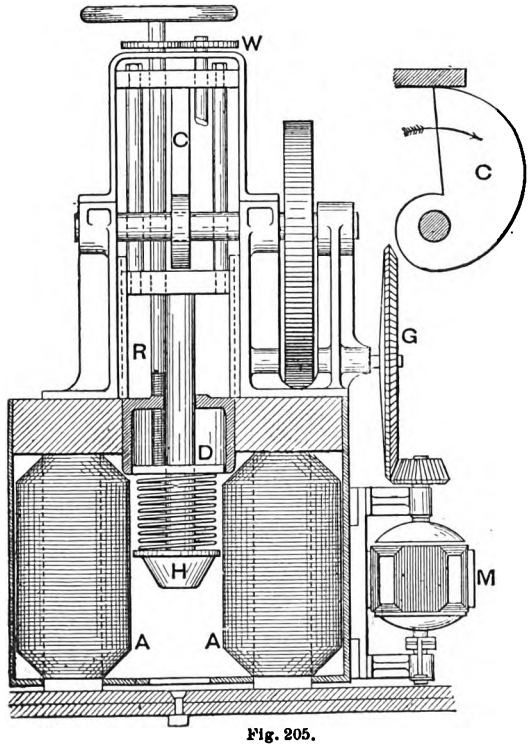


Fig. 205.

In neuerer Zeit hat F. J. Rowan in Glasgow verschiedene Formen von Werkzeugmaschinen hergestellt, hauptsächlich Niet- und Bohrmaschinen für den Gebrauch beim Bau von Eisenschiffen. Ein Elektromagnet *A A* (Fig. 205) bildet die Grundlage der Nietmaschine, die an jeder Stelle der Schiffsoberfläche, wo ein Niet einzutreiben ist, verwendet werden kann und dort zeitweilig festhängt. Eine elektromagnetische Triebmaschine *M* ist durch ein Triebwerk *G* mit einem schneckenförmigen Daumen *C*, der den Hammer *H* hebt, verbunden. Die Grösse der Kraft, mit der der Hammer auf das Niet niederfällt, hängt von der Feder hinter dem Hammerkopfe ab; die Kraft dieser Feder kann mit der Hand durch die Schraubenspindel *R* und das Zahnrad *W* bemessen werden. Der Gegenhalter beim Nieten wird ebenfalls durch einen Elektromagnet hergestellt, der so einge-

Digitized by Google

richtet wird, dass er auf der anderen Seite an den Eisenplatten festhängt.

Elektromagnetische Bohrer werden so hergestellt, dass sie sich selbst an das Werkstück durch einen Elektromagnet festhalten, der durch eine elektromagnetische Maschine betrieben wird. Rowan hat auch Werkzeuge zum Kalfaltern und Schleifen hergestellt, das elektromagnetisch betriebene Werkzeug befindet sich auf einem Rahmen, der als Führung dient und am Schiff durch Elektromagnete festgehalten wird [1]).

Im Februar 1891 hielt U. B. Atkinson in der Institution of Civil Engineers einen Vortrag über elektromagnetische Werkzeuge für Bergbauzwecke, in dem verschiedene elektromagnetische Bohrer und Kohlenhacken beschrieben wurden.

1) Weitere Belehrung über Rowans elektromagnetische Werkzeuge findet man in Proc. Inst. Mechanical Engineers 2. August 1887 und Trans. Inst. Engineers and Shipbnilders in Scotland, 20. März 1888.

Digitized by Google

Kapitel XIV.

Verhütung der Funkenbildung.

Es ist allgemein bekannt, dass beim Öffnen des Stromkreises eines gewöhnlichen Elektromagnetes ein Funken entsteht. Solche Funken schmelzen und zerfressen die Berührungsflächen der Tasten und Umschalter, bei schwingenden Apparaten verursachen sie eine schnelle Verschlechterung der Berührungsstücke.

In früherer Zeit sind zur Beseitigung dieses Übelstandes Mittel verschiedener Art angewendet worden. Die Berührungsoberflächen wurden zunächst aus Silber hergestellt; später verwendete man Platin, da dessen Widerstandskraft gegen Schmelzen und Oxydiren grösser ist. Trotz des hohen Preises ist Platin zur allgemeinen Einführung gelangt. Um die Berührungsfläche rein zu erhalten, ordnet man auch die beweglichen Theile so an, dass sie eine reibende Berührung an Stelle einer nur anschlagenden bildeten. Schliesslich sind schnappende Umschalter verwendet worden, d. h. Umschalter, die beim Öffnen des Stromes den beweglichen Theil von der Berührungsfläche mit rascher Bewegung entfernen und so den Funken niederhalten, der sonst folgen und die Oberfläche verbrennen würde.

Ursachen der Funkenbildung.

Zunächst ist erforderlich, die Natur der Funkenbildung näher zu erforschen. Der Funke tritt nie beim Schliessen, sondern beim Öffnen der Berührungsstelle ein. Er ist klein und matt in Stromkreisen, in denen keine Spulen und Elektromagnete sich befinden, aber hell und scharf in Stromkreisen, in denen solche vorhanden sind. Da die Funken Luftzwischenräume von sehr merklicher Weite, etwa von 1 bis 3 *mm* überspringen, so werden sie offenbar durch viel grössere elektromotorische Kräfte hervorgerufen werden, als die der gewöhnlichen Batterien. Eine elektromotorische Kraft von 100 V. wird nicht einmal einen Funken in einem Luftraum von 0,25 *mm* Weite übergehen lassen. Die elektro-

Digitized by Google

motorische Kraft, die Funken hervorruft, rührt allein von der Selbstinduction zwischen den verschiedenen Umwindungen der Kupferspule her. In dem Augenblick, in dem der Magnetismus verschwindet, wirken die Windungen aufeinander wie die primären und secundären Wickelungen einer Inductionsspule. In je schnellerem Verhältniss der Magnetismus abnimmt, desto grösser wird die elektromotorische Kraft der Selbstinduction. Die Stärke dieser Kraft kennzeichnet sich auch in den Schlägen, die man erhält, wenn man mit den Händen die beiden Theile des Stromkreises berührt, zwischen denen der Funke übergeht.

Man nannte den selbstinducirten Strom früher „Extrastrom" und sagte gewöhnlich, dass beim Schliessen des Stromes ein augenblicklicher Extrastrom entstehe, der in entgegengesetzter Richtung zum Hauptstrom verlaufe und verhindere, dass dieser sofort zu seinem vollen Werthe ansteige. Beim Öffnen des Stromkreises gebe es einen anderen augenblicklichen Extrastrom, der in gleicher Richtung mit dem abnehmenden Strom verlaufe und sich als Funke bemerkbar mache.

Im Kapitel VII ist bereits erläutert worden, dass jeder Stromkreis eine Zeitconstante besitzt, die durch das Verhältniss zwischen dem Coefficienten der Selbstinduction und dem Widerstande dargestellt wird. Der Selbstinduction ist der Funke des Extrastromes beim Öffnen des Stromkreises zuzuschreiben. Aber im letzteren Falle ist die Zeitconstante immer geringer als beim Schliessen des Stromkreises, weil, obwohl der Coefficient der Selbstinduction gleich bleibt, in dem Wege des Funkens eine wesentliche Vermehrung des Widerstandes stattfindet. Niemand weiss, ein wie hoher Widerstand bei einem Funken von 0,25 *mm* Länge zu überwinden ist. Es ist auch zweifelhaft, ob man sagen kann, dass ein bestimmter Widerstand für die Bewegung der Elektricität längs der Bahn für den Funken bestehe. Der Funke hat einen gewissen Antheil an der Eigenschaft des elektrischen Lichtbogens; ohne Zweifel vermehrt sich der Widerstand bei Verlängerung des Bogens, obwohl wahrscheinlich nicht in festem Verhältnisse.

In lehrreicher Art lässt sich diese Angelegenheit betrachten, wenn man sich erinnert, dass ein Theil der aus der Batterie fliessenden Energie bei Stromschluss zunächst die Aufgabe hat, das magnetische Feld zu erzeugen, mit anderen Worten, in dem Eisenkern die magnetischen Linien hervorzubringen. Diese Energie, die so lange im System wirkt, als das magnetische Feld

Digitized by Google

erhalten wird, also so lange, als der Strom fliesst, verschwindet, sobald der Strom unterbrochen wird. Der beim Öffnen entstehende Funke des Extrastromes ist die wahrnehmbare Art, in der die Energie des Magnetismus verbraucht wird. Die durch den Funken entwickelte Wärmemenge kann als ein Massstab der Energie gelten, die in dem System während der veränderlichen Periode aufgespeichert worden ist, während deren der Strom zu seiner endlichen Höhe angestiegen ist. Die so aufgespeicherte und wieder ausgegebene Elektricitätsmenge ist in ihrer Grösse derjenigen gleich, die der Strom zuführt, wenn er in seiner stetigen Höhe während einer den Zeitconstanten gleichkommenden Zeit fliessen würde. Bezeichnet man mit E die dem Stromkreise von der Batterie zugeführte Spannung in Volt, mit R den Widerstand des Stromkreises in Ohm, mit L den Coefficienten der Selbstinduction in Quadranten, so ist die Menge Q der in dem System wirklich aufgespeicherten Elektricität in Coulomb

$$Q = \frac{E}{R} \times \frac{L}{R} = \frac{E \cdot L}{R^2}$$

Da diese Menge bei der elektromotorischen Kraft E aufgespeichert wurde, während die Menge von 0 bis Q wuchs, so ist die von der Batterie geleistete und als potentielle Energie aufgespeicherte Arbeit

$$W = \tfrac{1}{2} \frac{E^2 \cdot L}{R^2}.$$

Wenn man annimmt, dass beim Öffnen des Stromkreises der Widerstand durch das Dazwischentreten eines Zwischenraumes plötzlich zu einem viel höheren Werthe R_1 ansteigt, so wird sich die Zeitconstante zu dem entsprechenden Werthe $\frac{L}{R_1}$ herabmindern und folglich, da die aufgespeicherte potentielle Energie mit einer grösseren elektromotorischen Kraft E_1 abfliesst, so ist

$$\tfrac{1}{2} \frac{E_1^2 L}{R_1^2} = \tfrac{1}{2} \frac{E^2 \cdot L}{R^2}$$

Es ist klar, dass der durch den Zwischenraum gebotene Widerstand viel hundert Mal grösser als der des ursprünglichen Stromkreises sein kann, also wird auch die elektromotorische Kraft, die den Funken durch den Zwischenraum treibt, viel hundert Mal grösser sein können, als die Kraft der Batterie.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass die kräftigsten Elektromagnete — unter sonst gleichen Umständen — die stärksten

Digitized by Google

Funken erzeugen müssen, denn der Coefficient der Selbstinduction wächst proportional der magnetischen Strömung im Kerne und der Zahl der Windungen, die ihn umgeben. Dennoch gibt es ein oder zwei andere Ursachen, die den Funken beeinflussen. Wenn ausser der Kupferdrahtspule noch ein anderer metallischer Kreis vorhanden ist, der den Kern umgibt, oder wenn der Kern selbst solide (nicht geblättert) ist, so werden im Augenblick, wenn der Magnetismus verschwindet, in jenem andern Stromkreise oder im soliden Kerne Inductionsströme ebenso wie in der Wickelung erzeugt; diese Wirbelströme suchen den Magnetismus zu erhalten, und indem sie ihn langsamer verschwinden lassen, verhindern sie das hohe Ansteigen der elektromotorischen Kraft. Solche dämpfenden Stromkreise vermindern den Funken an der Öffnungsstelle. Dieselbe Thatsache lässt sich anders auch so ausdrücken: Wenn gegenseitige Induction eintreten kann, so wird die Selbstinduction wirksam verringert. Die Gegenwart von Metallmassen, in denen Wirbelströme durch gegenseitige Induction erzeugt werden können, übt die Wirkung aus, dass sie die elektromotorischen Kräfte der Selbstinduction vertheilt, sie in ihrer Amplitude vermindert, und die Zeit des Verlaufes ausdehnt.

Das plötzliche Öffnen eines Stromkreises, in dem ein Elektromagnet eingeschaltet ist, bringt eine elektromotorische Kraft von erheblicher Grösse ins Spiel, gibt Anlass zu plötzlichen Schwingungen des Stromes und erzeugt plötzliche Spannungen in den isolirenden Schichten, so dass diese durchbohrt und dauernd beschädigt werden können. Higgins beobachtete[1]), dass solche plötzlichen Entladungen nicht den Gesetzen der stetigen Ströme folgen und statt einen spiralförmigen Leiter von 5 *cm* eines Kupferdrahts der No. 30 oder 24 der *BWG* Drahtlehre zu durchlaufen, einen unmittelbaren Weg einschlugen, der durch zwei Lagen Firniss und eine Luftschicht führt, obwohl hier vielleicht ein Widerstand von einigen Millionen Megohms vorhanden war.

Mechanische Einrichtungen zur Unterdrückung der Funken.

Auf einige Einrichtungen ist bereits hingewiesen worden, es soll jedoch eine Eintheilung der verschiedenen Methoden aufgestellt werden.

1) Journal of Society of Telegraph engineers VI 139.

Digitized by Google

1. Schnappende Umschalter. — Ein schnell unterbrechender Umschalter, der die Enden des Stromkreises weit auseinander bringt, ehe die selbst inducirte elektromotorische Kraft der Entladung Zeit gehabt hat, zu ihrem Maximum zu gelangen, gibt der elektromotorischen Kraft Anlass in anderer Weise zu wirken. Sie erzeugt eine hohe Ladung am Ende des Drahtes, die im Leiter sich wellenförmig bewegt, wenn sie nicht die Isolation durchbricht und dann verschwindet.

2. Unterbrechung unter Flüssigkeit. Wenn die Unterbrechung des Stromkreises unter Wasser oder Alkohol vorgenommen wird, vermindert sich der Funke oder wird unterdrückt, aber die Bedingungen sind schwierig zu erfüllen. Benutzt man Öl oder einen anderen Kohlenwasserstoff, so hängen sich an die Berührungspunkte kohlenhaltige Massen.

3. Auswischen der Funken. Der Verfasser hat vorgeschlagen, dass ein beweglicher Unterbrecher mittelst eines Kissens von Asbest, das von Zeit zu Zeit zu erneuern wäre, den Funken verwischen solle.

4. Ausblasen der Funken. Ein gerade zu rechter Zeit auf die rechte Stelle gesandter Luftstoss wird den Funken ausblasen. Dies geschieht am Stromabgeber der Maschine von Thomson-Houston.

5. Unterbrechung im magnetischen Felde. — Wenn die Unterbrechung an einer im magnetischen Felde liegenden Stelle des Stromkreises erfolgt, so wird der Funken mit aussergewöhnlicher Geschwindigkeit seitlich ausgeblasen. Wird der Stromkreis eines gewöhnlichen (grossen) Elektromagnetes dicht über seinem Pole oder in dem engen Raum zwischen Pol und Anker unterbrochen, so klingt das Geräusch des Funkens wie ein Pistolenschuss. Der Magnetismus fällt unter diesen Umständen mit grösserer Beschleunigung und die besondere elektromotorische Kraft ist viel höher.

Elektrische Einrichtungen zur Unterdrückung der Funken[1].

A. Abschaltung durch einen Widerstand. Wenn man über die Stelle des Stromkreises, an der die Unterbrechung eintreten soll, einen Draht von beträchtlichem Widerstand (ohne

1) Über diesen Gegenstand siehe Vaschy Annales Télégraphiques 1888. S. 290.

Digitized by Google

Windungen) anlegt, so wird der von der Selbstinduction herrührende Extrastrom hier einen Weg finden, auf dem er fliessen kann, ohne den Luftraum als Funke zu überspringen. Dering schlug im Jahre 1854 zuerst vor, einen etwa vierzigmal so grossen Widerstand als den der Elektromagnetspulen im Stromlaufe zu verwenden. Im Jahre 1864 nahm Dujardin diese Anordnung wieder auf. Ein gewundener Draht taugt nicht zu diesem Zwecke, weil er Selbstinduction besitzt; die Entladung geht nicht durch seine Umwindungen. Ein sehr dünner Platindraht ist besser, selbst ein Bleistiftstrich auf einer rauhen Oberfläche. Ein Wassertropfen zwischen zwei an den Enden des Stromkreises befestigten Platindrähten erfüllt denselben Zweck. Im Jahre 1880 schlug der Verfasser eine besondere Form eines Umschalters vor, bei dem quer über der Unterbrechungsstelle ein Draht von hohem Widerstand sich befindet; der Draht wird nach dem Durchgange der Entladung durch eine weitere Bewegung des Umschaltergriffes getrennt. Die Theorie des Nebenschlusses mit hohem Widerstande ist sehr einfach. Der Elektromagnet besitze einen Widerstand von r Ohm, die Stromstärke betrage i Ampère. Das Potential an den Enden der Unterbrechungsstelle betrage höchstens E Volt. Dividirt man nun E durch i so findet man den Werth eines Widerstandes R, sodass bei voller Stromstärke der Werth E sich ergäbe. Aber die Einschaltung des Widerstandes schwächt den Strom, der ohne Funkenbildung verschwindet. Als Beispiel nehmen wir den Fall, in dem $i = 0{,}05$ Ampère ist und 300 Volt als Grenzwerth für E gelten. Dann muss der als Nebenschluss zu benutzende Widerstand R gleich oder nicht grösser als $\frac{300}{0{,}05} = 6000$ Ohm sein, also sechzigmal so gross wie der Widerstand der Wickelung.

B. Abschaltung durch einen Condensator. Zwei Fälle sind hier zu unterscheiden: Ein Condensator von passender Capacität kann als Nebenschluss eingeschaltet werden: 1) quer über die Unterbrechungsstelle, 2) quer über die Enden des Elektromagnetes.

Besitzt der Condensator die genügende Capacität, so kann er als Nebenschluss zum Elektromagnet die hemmende Wirkung der Selbstinduction der Spule ganz ausgleichen, insofern der übrige Theil des Stromkreises in Betracht kommt, er verhindert aber nicht die verzögernde Wirkung in der Spule selbst. Wird der Condensator als Nebenschluss zu der Stelle gelegt, wo die Unterbrechung des Stromkreises stattfindet, so besitzt er keinen Einfluss

Digitized by Google

beim Schliessen des Stromes, da er in demselben Augenblick selbst kurzgeschlossen ist. Wenn aber der Stromkreis geöffnet wird, so vermindert er die Durchschlagsentfernung, weil jede Erhöhung der Capacität an den Endstellen die Potentiale an jenen Punkten vermindert. Ist die Capacität im Verhältniss zur Selbstinduction nicht gross genug, so kann sie den Funken nicht ganz verhindern. Ist sie ebenso gross oder grösser als der Werth $C = \frac{4L}{R^2}$, so gibt es keinen Funken, die Entladung aus dem Elektromagnet wird nach und von dem Condensator schwingen, bis sie verschwindet. Eine dritte Art der Verwendung eines Condensators besteht darin, ihn als Nebenschluss zu einem im Stromkreis eingeschalteten oder über die Unterbrechungsstelle gelangten Widerstandes zu verbinden. Helmholtz[1]) scheint der Erste gewesen zu sein, der die Verbindung von Condensator und Nebenschluss mit hohem Widerstande empfohlen hat.

C. Abschaltung mit einem Voltameter oder flüssigem Widerstande. Nach d'Arsonval soll dem Extrastrom ein besonderer Weg hergestellt werden, der, obwohl undurchdringlich für die gewöhnliche elektromotorische Kraft des Stromkreises, leicht durch die höhere elektromotorische Kraft der Selbstinduction überwunden wird. Ein Satz kleiner Voltameterzellen, die als Nebenschluss geschaltet werden, kann bei genügender Zahl vollständig dem gewöhnlichen Strom den Weg versperren. Wenn z. B. die Arbeitsbatterie 10 Volt Spannung besitzt, so wird ein Satz von 6 kleinen Zellen mit Bleiplatten (zum Polarisiren wie Accumulatoren fähig zu 2 Volt jede Zelle) nur elektromotorischen Kräften von einer höheren Spannung als 12 Volt Durchgang gewähren.

D. Schutz durch gegenseitige Induction. — Im Jahre 1867 schlug Varley zur Verminderung der Selbstinductionswirkung den Gebrauch einer Kupferhülse um den Kern vor. Die Wirkung eines solchen geschlossenen Stromkreises um den Kern ist im Beginn dieses Kapitels dargelegt worden. Im Jahre 1878 nahm Brush diesen Plan beim Bau der Feldmagnete seiner Dynamomaschine wieder auf.

Eine weitere Entwickelung dieses Gedankens erfolgte im Jahre 1870. Paine und Frost schoben eine Lage Metallfolie zwischen jede Drahtlage. Diese Art der Verwendung gegenseitiger

1) Siehe Anhang VIII zu v. Helmholtz. Tonempfindungen.

Digitized by Google

Induction ist seit 1887 durch Aron in Berlin benutzt worden. Sie wirkt insofern nachtheilig, als die Gefahr, dass die Isolation zerstört wird, sich erhöht.

E. Kurzschluss. Bei dieser Methode wird der Stromkreis nie geöffnet, jedoch ein Weg von sehr geringem Widerstande als Nebenschluss zum Elektromagnet vorgesehen. Wird eine Taste in dem Nebenwege niedergedrückt, so schlägt der Strom den Nebenweg ein und fliesst nicht länger um den Elektromagnet. Zur Erregung des Elektromagnetes muss man die Taste heben. Wird die Taste gehoben, so ist kein Magnetismus im Kerne vorhanden, um eine Entladung beim Verschwinden zu erzeugen, daher wird auch kein Funke entstehen, der beim Öffnen des Stromkreises hiervon herrührt. Beim Schliessen kann der Funke auch nicht auftreten, weil nur, nachdem der Stromkreis durch den Schluss hergestellt worden ist, der Magnetismus des Kernes verschwindet. Die Methode ist nicht zweckmässig, wenn nicht der Nebenschlussweg einen verhältnissmässig geringen Widerstand und geringe Selbstinduction besitzt. Auch verhindert sie nicht die von der Selbstinduction herrührenden Funken in anderen Theilen des Stromkreises. Sie findet hervorragend Verwendung bei Elektromagneten im Stromkreise der Bogenlampen oder in anderen Gleichstromkreisen. (Fig. 206).

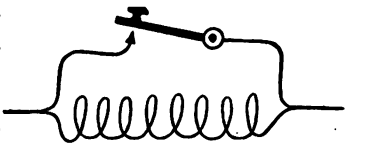


Fig. 206.

F. Differentialwickelung. Bei dieser Methode wird der Elektromagnet mit zwei getrennten Wickelungen versehen, die entweder in entgegengesetzter Richtung aufgewickelt oder so verbunden sind, dass der Strom in entgegengesetzten Richtungen um den Kern fliesst, und in jeder Spule die gleiche Zahl Windungen findet. Es kann diese Anordnung in verschiedener Weise ausgeführt werden, am besten in der Weise, dass die Spule mit zwei getrennten, gut isolirten, neben einander liegenden Drähten bewickelt wird. Eine dieser Windungen befindet sich im Hauptstromkreise, die zweite ist als Nebenschluss zu der ersten geschaltet und enthält einen Stromschlüssel. Wenn der Stromschlüssel gehoben wird, so fliesst der Strom nur in einer Wickelung und magnetisirt den Kern; wird er niedergedrückt, so theilt sich der

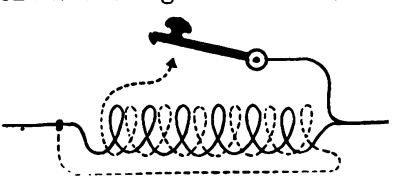


Fig. 207.

Digitized by Google

Strom, die Hälfte fliesst durch die eine Wickelung, die andere Hälfte durch die zweite Wickelung. Hierdurch wird die magnetisirende Kraft der einen Spule gegen die der andern ausgeglichen. Die Methode besitzt die Vortheile der Kurzschlussmethode, erfordert aber ein grösseres Gewicht an Kupfer; sie ist aber vollkommener, weil sie die Funkenbildung aus Anlass der Selbstinduction anderer Theile des Stromkreises verhindert. Sie ist mit grossem Erfolg für elektrische Klingeln von Jolin angewendet worden. (Fig. 207).

G. Methode der vielfachen Wickelung. Für elektromagnetische Sender hat Langdon Davies bei seinem harmonischen Telegraphen (Phonopore) eine vielfache Wickelung angewendet. Die Spule ist mit einer Anzahl (4 bis 20) besonderer Lagen feinen Drahtes bewickelt, für jede Lage wird ein besonderer Draht benutzt; alle Drähte haben gleiche Richtung, kehren aber nicht zum Ende jeder Lage wie bei gewöhnlichen Windungen zurück. Alle Drähte werden parallel geschaltet, so dass sie elektrisch wie ein Draht von grösserem Querschnitt wirken. In diesem Falle sind die Zeitconstanten der besonderen Kreise verschieden, weil der Coefficient der Selbstinduction der äusseren Lagen mit Rücksicht darauf, dass diese Wickelungen verschiedene Durchmesser besitzen, geringer und der Widerstand wegen der erheblichen Grösse grösser ist, als dies bei den inneren Lagen zutrifft. Das Ergebniss stellt sich so dar, dass an Stelle von Extraströmen, die alle in derselben Zeit verfliessen, solche in verschiedenen Zeiten in den Wickelungen verlaufen. Die gesammte elektromotorische Kraft der Selbstinduction steigt nie so hoch an, sie ist unfähig, einen grossen Luftzwischenraum zu überspringen oder auch nur den Funken zu geben, wie ihn ein gewöhnlicher Elektromagnet veranlasst. (Fig. 208).

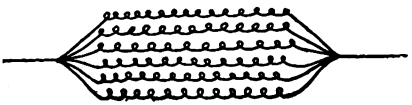


Fig. 208.

Vergleich verschiedener Methoden.

Der Verfasser hatte fünf Spulen hergestellt, alle von derselben Grösse, um sie auf denselben Kern zu setzen, aber in fünf verschiedenen Arten mit fast dem gleichen Gewicht an Kupfer umwickelt, um die hervorgebrachten Funken zu vergleichen. Die erste war in gewöhnlicher Weise gewickelt, die zweite mit einer Kupferhülse um den Kern versehen, die dritte mit zwischen-

Digitized by Google

gelegter Folie, die vierte war differential gewickelt und die fünfte mit vielfachen Drähten in 15 Lagen. Die differential gewickelte gab überhaupt keine Funken, in zweiter Reihe kommt No. 5 mit der vielfachen Wickelung, in dritter Reihe kommt die Wickelung mit zwischengelegter Folie, in vierter die mit der Kupferhülse. Die schlechteste war der Elektromagnet mit gewöhnlicher Wickelung.

Ausgleich der Selbstinduction im Stromkreise.

Die Selbstinduction eines Elektromagnetes lässt sich vollständig durch die Vereinigung eines Condensators mit einem

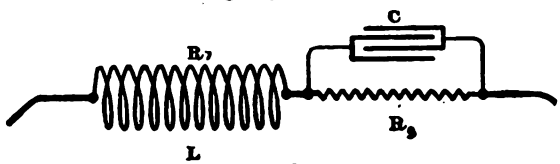


Fig. 209.

Widerstand (Fig. 209) aufheben. Bezeichnet man den Coefficienten der Selbstinduction eines Elektromagnetes mit L, seinen Widerstand mit R_1, die Capacität des Condensators mit C und den im Nebenschluss liegenden Widerstand mit R_2, so wird die verzögernde Wirkung des Elektromagnetes ausgeglichen, wenn die Bedingung $CR_1R_2 = L$ erfüllt ist.

Digitized by Google

Kapitel XV.

Der Elektromagnet in der Heilkunst.

Schon seit vielen Jahren haben Augenärzte sowohl Stahlmagnete, wie auch Elektromagnete benutzt. Freilich kennt man schon seit zwei Jahrhunderten[1]) den Gebrauch des Magnetsteines zu dem Zwecke, Eisenfeilspähne aus dem Augapfel zu ziehen, wie solche Spähne zuweilen Metalldrehern in Maschinenfabriken in die Augen gelangen. Im Jahre 1745 beschreibt Milnes in seinen „Beobachtungen über Medicin und Wundheilkunde", wie er einen Magnet zur Entfernung eines Stückes Eisen aus der Iris verwendete. Wahrscheinlich traf es nicht zu, wie er sagte: „Sofort sprang es heraus." Es ist eher anzunehmen, dass das Eisenstückchen in die Hornhaut vorn an der Iris eingebettet wurde. Nach Hirschberg[2]) war im Jahre 1842 Dr. Meyer in Minden der erste, der den Magnet zum Ausziehen von Metallstücken aus dem Innern des Augapfels benutzte.

In der Mitte unseres Jahrhunderts wurden glückliche Beseitigungen von Eisentheilen von Critchet[3]), Dixon, White, Cooper und anderen ausgeführt. Geringer Fortschritt scheint bis zum Jahre 1874 eingetreten zu sein, in dem Dr. Mc Keown in Belfast in British Medical Journal über verschiedene erfolgreiche Fälle berichtet, die mittels eines Stahlmagnetes, der an jedem Ende spitz zulief, um seine Einführung in das Auge zu erleichtern, ausgeführt wurden. Im Jahre 1880 benutzte Grüning in NewYork einen stählernen, aus einer Anzahl Cylinder gebildeten Dauermagnet. Die Cylinder waren an jedem Ende verbunden, und an einem Ende mit einem nadelförmigen Pole versehen.

---

1) Fabricius Hildanus Opera observationum et curationum, Frankfurt 1646. Von diesem seltenen Werke habe ich keinen Abdruck gesehen.

2) Hirschberg. Der Elektromagnet in der Heilkunde, Leipzig 1885.

3) The Lancet April 1854, S. 358.

Digitized by Google

Der erste Gebrauch eines Elektromagnetes in dieser Verbindung wird Hirschberg in Berlin im Jahre 1877 zugeschrieben. In England empfahl hauptsächlich Snell[1]) in Sheffield die Verwendung des Magnetes und erzielte glänzende Erfolge. Im British Medical Journal von 1881 beschreibt er sein Instrument und berichtet über das Ergebniss mehrerer Operationen. Seine Versuche wurden von da ab stets verbessert, in einer neuen Nummer desselben Blattes bringt er die Zahl der von ihm berichteten Fälle auf 77.

Für den besonderen Zweck ist ein Elektromagnet nothwendig, der mit verlängerten Polansätzen von verschiedenen Formen ausgerüstet werden kann. Diese sind in die Wunde des Augapfels auf genügende Tiefe einzuführen, sodass man den Eisensplitter anziehen und mitnehmen kann. Gleichzeitig ist es erforderlich, dass der Elektromagnet nicht zu schwer ist, damit der behandelnde Arzt ihn bequem in der Hand halten kann, dass er ferner durch den Strom einer Batterie von mässiger Grösse erregt wird, wie sie ein Augenarzt zu behandeln und unterhalten im Stande ist, ohne dass er einen Elektriker bei Gelegenheit der Benutzung herbeirufen muss. Es ist klar, dass unter sonst gleichen Bedingungen ein Magnet von beträchtlicher Zugkraft erwünscht ist, deshalb ist ein Magnet mit langem Kern oder eiserner Verlängerung am äussersten Ende des Kernes einem kurzem Magnet vorzuziehen. Möglicherweise kann auch eine Eisenmasse hinter dem Kopf des Kranken angewendet werden, um den Elektromagnet zu veranlassen, sein magnetisches Feld bis zur gewünschten Tiefe auszudehnen. Verschiedene Formen der Magnete sind zu solchen Zwecken angegeben worden.

Das Instrument von Snell, das als das Vorbild der gewöhnlich in England von Augenärzten gebrauchten Magnete angesehen werden kann, besteht aus einem weichen Eisenkern und einer Wickelung aus isolirtem Kupferdraht, der von einer Ebonithülse umgeben ist. An einem Ende befinden sich die Klemmen zur Anlegung der Batterieverbindungen, am anderen Ende der angesetzte Eisenkern, um die verschieden geformten Nadelpole aufzunehmen. Snell empfiehlt den Gebrauch eines Bichromatelements zur Erzeugung des Stromes.

---

1) Snell, The Electromagnet and its Employment in Ophthalmic Surgery, London Churchill & Co. 1883.

Digitized by Google

Das Instrument von Hirschberg besteht aus einem hohlen, cylindrischen Kern mit zwei gekrümmten spitzen Polen von verschiedener Dicke für äusserlichen oder innerlichen Gebrauch. Bradford in Boston erfand ein fast gleiches Instrument und auch fast gleichzeitig mit Snell. Es ist jedoch viel schwerer und wirkt kräftiger.

Mc. Hardy in King's College Krankenhaus benutzte ein ähnliches Instrument von geringerer Grösse und Schwere.

Die neueste Form wurde von Tatham Thompson in Cardiff angegeben; sie stellt eine Abänderung des Instrumentes von Snell dar, aber bei demselben Gewicht und gleicher Masse wird eine Zusatzkraft erforderlich, weil der magnetische Stromkreis mittels eines den Kern fortsetzenden und über die isolirte Spule gegen das Polstück hinausragenden Eisenrahmens vervollständigt wird. An dem Ende des Elektromagnetes lassen sich verschieden geformte Pole oder ein Polzwischenstück anbringen, falls ein tieferes Sondiren erforderlich ist. Als Batterie dienten ein oder mehrere Bichromat-Tauchzellen. Die Figur 210 stellt das Instrument in natürlicher Grösse vor. Das Gewicht beträgt 135 g.

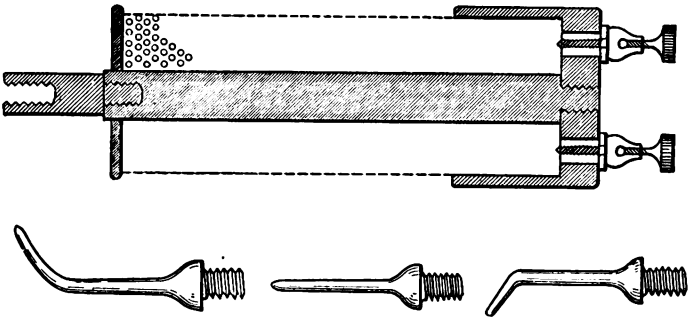


Fig. 210.

Am häufigsten gebraucht man das Instrument, um Stahlstückchen oder Eisenstückchen von der Oberfläche oder aus den Häuten des Auges zu entfernen; durch seine Benutzung wird die Verletzung der zarten Theile vermieden, die bei Anwendung der alten Methoden des Ausschneidens oder Ausziehens mit der Zange, dem Messer u. s. w. vorkamen. Seine werthvollsten Eigenschaften zeigen sich jedoch, wenn der Magnet zur Beseitigung fremder Körper verwendet wird, die durch die Augenwände gedrungen sind. In vielen Fällen ist der Magnet das einzige Mittel zur Erhaltung des Augenlichtes[1]) gewesen. An erster Stelle hat es einen

1) In Anlehnung an früher gegebene Quellen siehe Mellinger: Über die Magnetextractionen an der Baseler ophthalmologischen Klinik (Inaug. Dissert.) Basel 1887.

Digitized by Google

diagnostischen Werth, weil, wenn z. B. ein Splitter die Hornhaut oder einen vorgehenden durchscheinenden Theil des Auges durchbrochen hat, oft festgestellt werden kann, ob er aus Stahl oder Eisen besteht, indem man beobachtet, ob er durch dichte Annäherung des Instruments beeinflusst wird. Kann man keine Bewegung beobachten und fühlt der Kranke keinen eigenthümlichen ziehenden Schmerz bei der Annäherung des Magnetes, so rührt dies entweder daher, dass der Splitter aus nicht magnetisirbarem Metall besteht, oder durch Gewebe festgehalten, oder in Folge der Entzündung der Umgebung eingeschlossen gehalten wird. Wird in diesem Falle eine aufgehängte sehr leichte Nadel magnetisirt und nahe an das Auge gehalten, so findet man zuweilen, dass sie sich gegen den fremden Körper neigt. Sollte es ein Stahlstück sein, so wird diese Wirkung verstärkt, wenn man den Elektromagnet eine Zeit lang dem Auge nahe hält, sodass der verletzende Theil magnetisirt wird.

Ferner wird das Instrument häufig gebraucht, einen nicht erreichbaren Splitter aus einer Stelle des Auges zu entfernen und ihn in günstigere Lage zu bringen. Es möge z. B. ein Stahl- oder Eisensplitter die Hornhaut durchdrungen haben und in der Krystalllinse sitzen; in verschiedenen Fällen ist es dann vorgekommen, dass bei Anwendung des Elektromagnetes auf der Hornhaut, das Metall durch die Linsensubstanz vorwärts durch die wässerige Feuchtigkeit gezogen wurde, die sich in der vorderen Augenkammer des Auges befindet, und dann beim Öffnen des Stromes auf den Boden der vorderen Kammer niederfiel. Hierauf wurde eine schmale Öffnung an der tiefsten Stelle gemacht, der Pol des Instruments eingeführt und der Splitter schnell beseitigt. In einem jüngst berichteten Falle war ein Splitter mit scharfer Spitze tief in die Linse eingedrungen; man sah, wie er seinen Weg durch die Linsensubstanz, die Linsenkapsel, dann durch die Regenbogenhaut nahm, durch die Hornhaut gezogen und dann vollständig entfernt wurde, ohne dass irgend ein Einschnitt zu machen gewesen wäre.

In solchen Fällen jedoch, in denen der fremde Körper den Glaskörper des Auges durchdrungen hat, machen sich die durch den Elektromagnet erzielten Ergebnisse am besten bemerkbar. Wo nur die vordere Kammer oder die Linse der Sitz des fremden Körpers ist, können möglicherweise auch andere Mittel Erfolg herbeiführen, ist aber ein Splitter in den Glaskörper eingedrungen,

Digitized by Google

so bedarf man eines Instruments, mit dem man nicht blindlings umher sucht, dabei den zarten Bau verletzt und die Gefahr, dass der Inhalt ausläuft, herbeiführt, sondern eines Instrumentes, das den verletzenden Köper an sich heranzieht; hierbei leistet das betrachtete Instrument die höchsten Dienste.

Viele erfolgreiche Fälle haben Snell, Hirschberg, Lloyd Owen, Mc Hardy und andere beschrieben; es wurden Stahlstücke so aus Augen entfernt, die sonst unvermeidlich verloren gewesen wären.

Die ernstesten und verzweifelten Fälle treten ein, wenn das Metall wirklich die innere Kammer durchschlagen hat und in der Netzhaut oder der Aderhaut eingebettet liegt. So weit sich übersehen lässt, sind nur drei erfolgreiche Entfernungen von Splittern von dieser Lage bisher mitgetheilt worden. Die erste wurde von Galezowski im Jahre 1882 berichtet, wo ein Eisensplitter durch Hornhaut, Regenbogenhaut und Linse hindurchgegangen war und sich in der Netzhaut festgesetzt hatte. Die Lage des Splitters war durch einen Augenspiegel festgestellt worden. Ein Einschnitt wurde in die sog. weisse Haut des Auges über der Stelle gemacht und der Splitter mit Hülfe des Elektromagnetes entfernt. Der zweite Fall wurde von Hirschberg im Jahre 1888 angegeben, der dritte von Tatham Thompson in Cardiff im Jahre 1890. Einige nähere Angaben über ihn werden die Art des Verfahrens gut beleuchten.

Der Kranke war als Grobschmied in einer der Kohlengruben in Südwales beschäftigt; am 8. December traf ihn ein Splitter von einem neuen Werkzeuge ins linke Auge. Dieser schlug gegen „das Weisse vom Auge“ ungefähr 0,6 *cm* vom Rande der Hornhaut. Zuerst fühlte der Mann gelinden Schmerz, nach zwei Tagen jedoch überkam ihn grosser Schmerz, und eine beträchtliche Störung und Verminderung des Sehvermögens trat nicht nur auf dem verletzten, sondern auch auf dem gesunden Auge ein.

Am 10. December wurde er nach Cardiff in das Krankenhaus geschickt. Bei der Untersuchung fand man eine kleine Wunde an der Stelle, wo der Splitter eingetreten war, bei der Untersuchung mit dem Augenspiegel konnte man das Stahlstück in der Netzhaut am oberen äusseren Theile eingebettet sehen. Den Weg, den der Splitter beim Durchgange durch den Glaskörper genommen hatte, konnte man an der schwachen Trübung der Flüssigkeit unterscheiden. Das unbeschädigte Auge zeigte be-

Digitized by Google

stimmte Anzeichen sympathetischer Erregung. Am nächsten Tage wurde der Kranke mit Äther behandelt, die Eintrittswunde leicht vergrössert, um die Einführung des Poles des Elektromagnetes zu ermöglichen. Der Pol wurde durch den Glaskörper in einer Richtung, die nach der Berechnung der ursprünglich vom Splitter eingeschlagenen gleichkam, hindurchgeführt. Der erste Versuch verlief ohne Ergebniss, aber bei dem zweiten Versuche kam das Stahlstück leicht durch die Wunde sozusagen „im Schlepptaue" des Poles.

Nur ein sehr kleines Tröpfchen der Glasflüssigkeit lief aus; das Auge wurde antiseptisch behandelt und verbunden. Nach Verlauf von vierundzwanzig Stunden konnte der Patient Finger in einer Entfernung von $1^1/_2\ m$ zählen, war frei von Schmerz und Lichtscheu, auch hatte die Verdunkelung des anderen Auges stark nachgelassen. Die Wunde heilte in drei Tagen, das Sehen verbesserte sich stetig, bis der Patient am 30. December mässig grossgedruckte Schrift lesen konnte. Bei der Untersuchung mit dem Augenspiegel konnte die in der Netzhaut entstandene Narbe an der Stelle, wo der Splitter gesessen hatte, genau festgestellt werden, ebenso waren einige Blutflecke, die entweder durch Verletzung vom Eindruck des Splitters oder von Netzhautgefässen beim Entfernen verursacht waren, bemerkt worden.

Am 13. Januar 1891 konnte der Patient kleine Druckschrift lesen, sein mittleres Sehvermögen war so gut wie je, aber sein Gesichtsfeld war etwas beschränkter — die Beschränkung entsprach dem Theil der Netzhaut, die durch den fremden Körper verletzt worden war.

Der Elektromagnet wird auch in der allgemeinen Wundheilkunst zur Entfernung von Nadeln aus den feinen Geweben des Körpers oder der Glieder benutzt.

Digitized by Google

Kapitel XVI.

Dauermagnete.

Das Festhalten des Magnetismus, wie es Magnetstein und harter Stahl zeigen, war die Thatsache, die zuerst die Aufmerksamkeit auf die magnetischen Naturerscheinungen lenkte. Als man fand, dass durch Berührung harter Eisenstücke Magnetismus mitgetheilt werden konnte, benutzte man derartige Stücke zur Anfertigung von Kompassnadeln und von künstlichen Magneten. Servington Savary[1]) scheint zuerst die Verwendung von gehärtetem Stahl im Jahre 1729 angegeben zu haben. Er bemerkt, dass Stahl nicht nur aufnahmefähiger ist, sondern den Magnetismus auch besser zurückhält als gewöhnliches Eisen; hartgehämmertes Eisen oder Stahl besser als im weichen Zustand; durch Ablöschen gehärteter Stahl am besten. Nach seiner Beobachtung kann Stahl in Bezug auf Zurückhaltung des Magnetismus (nicht in Bezug auf Aufnahmefähigkeit) nicht hart genug hergestellt werden. Im Kapitel III über die Eigenschaften von Stahl und Eisen, sind genaue Angaben über die Eigenschaft des Festhaltens mitgetheilt worden. Will man verschiedene Brände von Stahl mit einander vergleichen, um festzustellen, welche Sorte sich am besten zur Herstellung von Dauermagneten eignet, so müssen zwei Dinge bekannt sein: 1) Die Remanenz (siehe S. 85), oder der Rückstand von B nach der Anwendung einer stark magnetisirenden Kraft; 2) die Coercivkraft (siehe S. 85), oder die Grösse der negativ magnetisirenden Kraft H, die nöthig ist, den zurückbleibenden Magnetismus auf Null zu bringen. Die so erforderliche Kraft, um irgend einer Sorte den zurückbleibenden Magnetismus zu entziehen, kann als Mass des Bestrebens gelten, mit dem Stahl dieser besonderen Eigenschaft zurückbleibenden Magnetismus fest-

---

1) Servington Savary. Magnetical Observations and Experiments. Philos. Transact. Bd. 36 (1729) S. 295—340.

Digitized by Google

zuhalten sucht. Für den vorliegenden Zweck ist es daher wichtiger, dass die Sorte grosse Coercivkraft besitzt. Bei der Sorte ausgeglühten Drahtes, den Ewing untersuchte (siehe S. 86) betrug die Remanenz 10 500, die Coercivkraft 24.

Die folgende Tabelle ergibt die Remanenz und Coercivkraft einer Zahl Eisen- oder Stahlproben, verbunden mit einigen Angaben, z. B. über den Grad, bis zu dem die Magnetisirung zeitweilig getrieben wurde, um die bezüglichen Rückstände zu hinterlassen. Die Zahlen sind den Untersuchungen von Ewing und Hopkinson entnommen.

Bezeichnung der Probestücke.	Beobachter	Maximum von H	Maximum B	Rückstand B	Coercivkraft	Rückstand J	Specifische Magnetisirung
Stahldraht, hart gezogen	Ewing	57	14 300	8 200	16	652	84
„ ausgeglüht	„	53	14 600	11 700	17,5	931	119
„ glashart	„	55	9 400	6 800	39	541	69
Pianoforte-Stahldraht, gewöhnlicher	„	92	14 600	11 800	27	939	120
„ ausgeglüht .	„	94	14 300	10 500	24	836	107
„ glashart . .	„	98	12 700	9 600	41	747	98
Gusseisen	„	16	3 700	2 600	8	207	26,5
Sehr weicher Eisendraht	„	17	13 500	11 000	1,9	875	112
Ausgeglühtes Schmiedeeisen . . .	„	90	16 200	12 700	3	1010	129
Whitworth, weicher Stahl, ausgeglüht	Hopkinson	250	16 120	10 740	8,3	855	109
„ „ „ in Öl gehärtet	„	„	16 120	8 736	19,4	695	89
Chromstahl, geschmiedet	„	„	14 680	7 568	18,4	602	77
„ ausgeglüht	„	„	13 233	6 489	15,4	516	67
„ in Öl gehärtet . . .	„	„	12 868	7 891	40,8	628	81
Wolframstahl, geschmiedet . . .	„	„	15 718	10 144	15,7	807	104
„ ausgeglüht	„	„	16 498	11 008	15,3	876	112
„ in lauem Wasser gehärtet	„	„	15 610	9 482	30,1	755	97
„ (Französ.) in Öl gehärtet .	„	„	14 480	8 663	47,1	687	88
„ sehr hart	„	„	12 133	6 818	51,2	542	69

Bei seinen Versuchen benutzte Ewing entweder Drähte von grosser Länge im Verhältniss zum Durchmesser oder Ringe. Bei den Versuchen von Hopkinson wurden dünne Stäbe in dem auf S. 67 beschriebenen Apparate benutzt. Das Vorhandensein eines Joches aus weichem Eisen bringt die Wirkung hervor, dass die Probe sich so zeigt, als ob sie praktisch von unendlich grosser Länge im Verhältniss zur Dicke wäre.

Digitized by Google

Höchstwerthe der Dauermagnetisirung.

Beobachter und Material.	Rückstand J	Rückstand B	σ
Weber's gewöhnlicher Stahlmagnet.	314	3 947	40
von Waltenhofen's Wolframstahl, glashart.	369	4 638	47
Schneebeli's Nähnadeln, 2,5 bis 6,6 *cm* lang. . . .	557	7 001	71,4
0,06 dick	671	8 435	86
„ Stricknadeln 19,8 bis 21 *cm* lang. . . .	765	9 626	28
0,083 bis 0,175 dick. . .	832	10 458	107
Hopkinson's Wolframstahl, in Öl gehärtet.	687	8 643	88
„ „ sehr hart.	542	6 818	70
Ewing's Stahldraht, glashart.	541	6 800	69
„ Pianofortedraht, glashart	747	9 600	98
Perry, Jowitt's Stahl.	1 003	12 600	129
Preece, Wall's Stahl.	120	1 519	15,5
„ Asforth's Stahl	143,5	1 704	17,3
„ Saunderson's Stahl.	114,2	1 435	14,6
„ Jowitt's Stahl.	109,6	1 503	15,3
„ Vicker's Stahl.	93,4	1 174	12
„ Crewe „Nietenstahl".	14,8	186,6	1,9
„ „ „Federstahl".	110,5	1 391	14,2
„ Clemandot Stahl (gepresst und angelassen). .	170	2 264	23,2
„ „ (gepresst aber nicht angelassen)	106,1	1 333	13,6
„ Marchal Stahl.	202,2	2 540	26
„ Allevard Stahl (in Quecksilber gehärtet). . .	104,6	1 315	13,4
„ „ (in Wasser gehärtet). . . .	132,1	1 660	16,9
Gray's Magnetstahl, glashart.	520	6 536	66
Evershed's Wall's- und Jowitt's-Stahl (mittel) . . .	318 bis 398	4 000 bis 5 000	41 bis 51
Brown's Magnetstahl, glashart.	477 bis 556	6 000 bis 7 000	61 bis 72

In der vorstehenden Tabelle sind einige Werthe der höchsten Magnetisirung, die durch kräftige, in gewöhnlichem Verfahren hergestellte Stahlmagnete festgehalten worden ist, und einige Werthe der specifischen Magnetisirung σ oder das magnetische Moment für das Gramm angegeben.

Bei der Tabelle ist zu bemerken, dass die Abmessungen der von verschiedenen Beobachtern gebrauchten Proben einen grossen Unterschied zeigen. Wie früher festgestellt, übt das Verhältniss zwischen Länge und Durchmesser für die zeitweilige

Digitized by Google

Magnetisirung eines Polstückes schon einen erheblichen Unterschied aus, bei der Magnetisirung für die Dauer treten die Unterschiede noch schärfer hervor. Bei Schneebeli's Versuchen betrugen die Längen 100 bis 800 Durchmesser, bei Ewing's Versuchen über 200 Durchmesser; Hopkinson's Versuche lieferten praktisch Ergebnisse wie endlose Stäbe; Perry benutzte die Hufeisenform mit einem Anker aus weichem Eisen geschlossen; Gray[1]) quadratische Stäbe ungefähr 60 Durchmesser lang; Brown[2]) Cylinder von 33 bis 37 Durchmesser; Preece[3]) dagegen kurze quadratische Stäbe von 10 *cm* Länge und 1 *cm* Seitenlänge. Die von Preece gelieferten Ergebnisse bilden Mittel von mehreren Musterstücken derselben Sorte, nicht das von jeder Probe erhaltene beste Ergebniss. So ist z. B. der mittlere Rückstand B für Marchal's Stahl mit 2540 angegeben, der beste Magnet dieser Sorte zeigte jedoch 2835.

Die Zahlen J in der ersten Spalte der letzten Tabelle bedeuten die Werthe des zurückbleibenden magnetischen Moments für das Kubikcentimeter der Substanz (in CGS Mass) und sind aus dem Rückstand B durch Division mit 4π gewonnen. Einige Schriftsteller des Festlandes ziehen es vor, die Werthe in Ausdrücken des magnetischen Moments für das Gramm anzugeben, eine Menge, die auch die „spezifische Magnetisirung" des Materials genannt wird. Ist die Dichtigkeit des Probestücks bekannt, so kann man die spezifische Magnetisirung σ aus dem Rückstande J durch Division mit der Dichte berechnen. Man nehme z. B. Gray's Angabe 9804 für den Rückstand B, dividirt durch 4π und erhält Rückstand J, dann dividire man durch 7,8 (Dichte des Drahtes) und erhält 100 für die spezifische Magnetisirung. In der ersten Tafel sind die einzigen Muster, die Werthe über 100 für die spezifische Magnetisirung zeigen, von Schneebeli und Perry gewonnen. Die Ergebnisse von Preece mit kurzen Magneten von 10 Durchmessern zeigen schwankende spezifische Magnetisirungen von 2 (Crewe Nietenstahl) bis 26 (Marchal's Stahl).

Ewing fand beim Gebrauch sehr grosser magnetisirender Kräfte, die den zeitweiligen Werth von B für Lowmoor und schwedisches Eisen bis über 30000 (siehe S. 74) brachten, dass

1) Phil. Mag. Dec. 1885.
2) Phil. Mag. Mai 1887.
3) The Electrician XXV, S. 547 19. Sept. 1890.

Digitized by Google

die Rückstandswerthe von B nur 515 bez. 500 waren, während Schmiedeeisen nur 400 zeigte. Dies entspricht dem Rückstande J von 40, 32 bez. 30 und der specifischen Magnetisirung von nur 6 bis 5. Du Bois, der auch ungewöhnlich starke Felder benutzte, fand die rückständige spezifische Magnetisirung für elektrolytisch gefälltes Nickel gleich 10,6 und elektrolytisches Eisen gleich 70 bis 106. Eine Vergleichung zwischen der zurückhaltenden Eigenschaft des glassharten Stahles und der des Magneteisensteines ist von A. L. Holz angestellt worden[1]).

Beziehungen zwischen Dauermagnetismus und der chemischen Zusammensetzung des Materials.

Wenige der oben angeführten Versuchssteller haben die chemische Zusammensetzung der von ihnen benutzten Stoffe angegeben. Die Ergebnisse von Hopkinson[2]) besitzen einen besonderen Werth, weil sie von sorgfältigen Analysen des Wolframstahles, welche die besten Ergebnisse lieferten, begleitet sind. Die Zusammensetzung war:

Chromstahl:		Wolframstahl:	
Eisen	97,893	Eisen	95,371
Kohle	0,687	Kohle	0,511
Mangan	0,028	Mangan	0,625
Schwefel	0,020	Silicium	0,021
Kiesel	0,134	Phosphor	0,028
Phosphor	0,043	Wolfram	3,444
Chrom	1,195		

Einfluss des Anlassens, des Korns und der Form.

Bei der Zubereitung von Dauermagneten verdient das Anlassen fast dieselbe Beachtung wie die chemische Zusammensetzung. Viele Fabrikanten haben ihre eigene beliebte Methode des Härtens und Anlassens[3]) und wenige können oder wollen genaue Einzelheiten angeben. Auch lässt sich keine allgemeine Regel für das beste Verfahren angeben, denn das für einen Brand von Stahl

1) Wiedemann's Annalen, V, S. 169, 1878.

2) Phil. Trans 1886 II S. 455.

3) Anlassen bedeutet nicht Härten, obwohl zuweilen der Begriff verwechselt wird, indem der Ausdruck irrthümlich angewendet wird. Anlassen bezeichnet das Verfahren, den Stahl auf einen weicheren Zustand durch theilweises Wiedererhitzen nach dem Härten zu bringen.

Digitized by Google

geeignete Verfahren weicht vollständig von dem ab, das für einen andern Brand passt. Überdies ist, wie gezeigt werden wird, das beste Anlassen für kurze Magnete ganz verschieden von dem für lange und hufeisenförmige Magnete geeigneten Verfahren. Es unterliegt jedoch keinem Zweifel, dass es sehr wünschenswerth erscheint, ein feines, gleichmässiges Korn sicher zu stellen, da jeder Mangel in der Gleichförmigkeit die Güte des Magnetes herabzusetzen sucht. Ein ungeschickter Schmied wird beim Schmieden eines Magnetes sein Gefüge verderben, wenn er ihn zu viel und ungleichmässig bearbeitet. Man nimmt gewöhnlich an, dass je härter ein Stück Stahl ist, um so grösser die festhaltende Kraft sein soll. Unter diesem Eindruck müssen jedoch zwei gesonderte Eigenschaften verstanden werden. Einige Stahlsorten zeigen nach der Magnetisirung eine grosse rückständige Magnetisirung, die jedoch nach Wochen und Monaten verschwindet. Einige andere Stahlsorten werden eine geringere Remanenz zeigen, werden aber viel länger den Rückstand behalten. Die Frage der Constanz des Festhaltens wird später besonders behandelt werden.

Stahl lässt sich auf zweierlei Weise härten. Bei dem einen Verfahren wird er plötzlich von der hellrothen Glühhitze abgekühlt, bei dem anderen Verfahren wird er einem sehr hohen Drucke durch hydraulische Maschinen so lange ausgesetzt, bis er langsam abgekühlt ist. Bei der ersteren gewöhnlicheren Methode kühlt sich die äussere Kruste plötzlich ab, während der innere Theil noch plastisch ist, und drückt diese, wahrscheinlich in Folge der Zusammenziehung, zusammen. Bei der letzteren Methode, die in Frankreich von M. Clémandot angewendet wurde, tritt das Härten zwar weniger bis zum Äussersten ein, erfolgt aber gleichmässiger. Drähte lassen sich auch durch Ziehen in der Längsrichtung härten, doch wendet man dieses Verfahren bei Herstellung von Magneten nicht an. Werden dünne Stahlstäbe bis zur Rothgluth oder beinahe bis zur Weissgluth erhitzt und dann plötzlich in Wasser, Öl oder am besten in Quecksilber getaucht, so werden sie äusserst hart und spröde und spalten häufig bei dem Verfahren. Diesen Zustand nennt man den glasharten. Erhitzt man glasharten Stahl dann wieder kurze Zeit, so wird er etwas weicher und nimmt einen blassen gelblichen Ton auf der Oberfläche an, dieses Anlassen nennt man „Strohfarbe“. Lässt man durch Fortsetzung des Glühens ihn noch weicher werden, so erhält er einen blauen Ton; dieses Anlassen wird für stählerne

Digitized by Google

Federn, Stahlfedern und andere Zwecke, die biegsames Material erfordern, benutzt. Die weitere Fortsetzung der Erhitzung macht den Stahl weich, indem er in Folge der Rothhitze ausgeglüht wird. Wenn es zuträfe, dass die härtesten Magnete die besten wären, ist es klar, dass keiner durch Anlassen weicher gemacht werden dürfte, vielmehr sollte er glashart belassen werden, was jedoch praktisch keineswegs das beste ist.

Die Bezeichnung des Härtegrades nach dem Farbenton ist sehr unbestimmt. Glücklicherweise hat man gefunden, dass Stahl noch eine und zwar besser messbare Eigenschaft besitzt, die sich fast genau nach der Härte abstuft, nämlich der elektrische Widerstand. Barus[1]), der diese Thatsache untersucht, und Fromme[2]) haben nachgewiesen, dass diese Beziehungen im engen Zusammenhange stehen, Strouhal und Barus[3]) haben die Eigenschaft benutzt, um die Härte verschiedener, der Magnetisirung unterworfener Stäbe zu kennzeichnen.

Als Beispiel geben sie folgende Werthe für eine Stahlprobe.

Zustand	Spezifischer Widerstand in Microhms für das Cubikcentimeter
Glashart	45,7
Hell strohfarben	28,9
Strohfarben	26,3
Blau	20,5
Hellblau	18,4
Weich	15,9

Bei allen Vergleichen zwischen Härte und dem Vermögen, Magnetismus festzuhalten, mussRücksicht auf die Form des Magnetes genommen werden; denn wie bereits erwähnt, besitzen kurze und lange Magnete verschiedene Eigenschaften. Bei fast allen angestellten Versuchen besassen die verwendeten Stahlstäbe oder Drähte quadratischen oder kreisförmigen Querschnitt, gewöhnlich den letzteren. Demgemäss wird ein gerader Magnet gewöhnlich

1) Wied. Annalen VII. 1879, S. 411.
2) daselbst. VIII. 1879, S. 352.
3) Wied. Annalen XX. 1883. S. 525.

Digitized by Google

in der Weise beschrieben, dass man angibt, um wieviel Mal seine Länge grösser als sein Durchmesser ist. Bei einigen von Ewing's Versuchen mit weichem Eisen (siehe S. 78) wurden Stäbe von verschiedenen Längen von 50 bis 100 Durchmessern verwendet; die Ergebnisse (Fig. 43) zeigten, dass selbst wenn die vorübergehende Magnetisirung für alle bis nahezu demselben Grade gesteigert wurde, doch die längeren Stäbe eine grössere Remanenz als die kürzeren zeigten. Für das Verhältniss zwischen Länge und Durchmesser möge der Buchstabe δ benutzt werden.

Einige wichtige Untersuchungen über die Wirkung des Härtens durch Strecken an Magneten verschiedener Abmessung wurden von Cheesman[1]) angestellt. Er fand bei Verwendung eines englischen Silber-Stahldrahtes (von Gebr. Cook) von 1,28 *mm* Durchmesser und 90 *mm* Länge (d. i. $\delta = 70$), der durch Berührung mit einem grossen Elektromagnet erregt wurde, dass beim Härten durch Strecken der Dauermagnetismus, den der Magnet erhalten würde, abnahm. Die Magnetisirung wurde nach jedem Strecken wiederholt.

	Streckendes Gewicht in *kg*	Spezifische Magnetisirung
Weicher Stahl	0	78,1
Härter	30	77,3
Noch härter	60	70,8
Noch härter	70	63,7
(Draht gebrochen)	75	55,6

Bei einer anderen Reihe von Versuchen wurde die Länge verändert.

Verhältniss der Abmessung (δ)	Specifische Magnetisirung	
	weich	hart
22,5	16,4	18,0
40,4	48,0	48,4
58,6	75,6	60,4

1) Cheesmann. Über den Einfluss der mechanischen Härte auf die magnetischen Eigenschaften des Stahles und des Eisens; Inaug.-Diss. 1882. Leipzig. Siehe auch Wiedemanns Annalen XV. 204 und XVI. 712, 1882.

Digitized by Google

Aus diesen und zahlreichen anderen Untersuchungen schloss Cheesman, dass bei kurzen Magneten das Härten des Stahles das Vermögen, Magnetismus festzuhalten, zunehme, während bei langen Magneten es abnehme. Er stellte als kritischen Werth von δ für die untersuchte Art Stahl 41 Durchmesser fest.

Strouhal und Barus stellten eine eingehende Untersuchung einschliesslich der Frage über den Einfluss des Anlassens an. Sie verwendeten verschiedene Arten Eisen und Stahl, aber die angeführten Ergebnisse beziehen sich auf Magnete, die aus Silberstahldraht mit einem Durchmesser von 1,48 *mm* und einer Dichte 7,7 hergestellt waren. Aus diesem Stahl wurden fünf Magnete in Längen von 10 bis 50 Durchmessern hergestellt. Sie wurden zuerst durch plötzliches Abkühlen in Wasser glashart gemacht und dann magnetisirt. Darauf wurden sie dem nachstehenden Verfahren ausgesetzt. Nachdem der Magnetismus durch einen Strom von 30 Ampère wieder erregt worden war, wurde er mittels Magnetometers von Zeit zu Zeit beobachtet. Dann wurden die Magnete a) in Dampf von 100° *C* eine Stunde lang erhitzt, die Erhitzung wurde auch auf zwei, drei, vier Stunden ausgedehnt; b) in Anilindampf von 115° zwanzig Minuten, eine Stunde, zwei Stunden, sechs Stunden erhitzt, c) in schmelzendes Zinn bei 240° gelegt, d) in schmelzendes Blei bei 330° gelegt; e) in schmelzendes Zink bei 420° (diese Temperatur ist starke Rothglut); f) zur Rothglut gebracht, so dass der Stahl vollständig weich wurde; darauf wurde der Magnet in eine Glasröhre in Leim gelegt und langsam abgekühlt. Die Ergebnisse, die von höchster Wichtigkeit waren, finden sich in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Die in der Spalte „Härte" gegebenen Zahlen stellen den specifischen elektrischen Widerstand in Microhms dar. Es ist interessant zu beachten, wie bei kurzen Magneten die specifische Magnetisirung abnimmt, dann eine Neigung zur Zunahme zeigt, und mit dem Weichwerden wieder abnimmt. Noch ein anderer Umstand macht sich bemerkbar, nämlich dass in jedem Falle der Erhitzung in Dampf die Magnetisirung, die ein Magnet zurückhalten kann, etwas sich vermindert, aber dass nach etwa fünf oder sechs Stunden ein praktischer gleichbleibender Werth sich ergibt.

Eine sehr grosse Zahl Beobachtungen mit Draht derselben Sorten wurden mit praktisch gleichen Ergebnissen angestellt. Die Versuchssteller bemühten sich, (nach galvanischer Skala) die wirkliche Härte und den magnetischen Werth ihrer Stahlsorten fest-

Digitized by Google

zustellen, wenn bis zu den den Fabrikanten bekannten Anlauffarben angelassen wurde.

Gang des Anlassens.	Härte	Spezifische Magnetisirung. $\delta =$ 9,9	20,3	29,2	40,5	49,8
Glashart	43,8	**24,8**	41,0	47,2	50,8	52,5
1 Std. in Dampf bei 100°	38,6	23,3	39,2	45,2	48,7	50,4
3 „ „ „ „ 100°	36,5	23,4	38,6	44,5	47,7	49,3
6 „ „ „ „ 100°	35,1	23,3	38,6	44,3	47,4	49,1
10 „ „ „ „ 100°	34,3	23,3	38,3	44,2	47,4	48,9
20 Min. in Amilindampf „ 185°	29,0	21,0	38,9	46,0	50,3	52,3
1 Std. „ „ „ 185°	27,5	21,3	40,2	48,1	52,9	55,1
3 „ „ „ „ 185°	25,6	21,6	42,7	52,2	57,7	60,2
7 „ „ „ „ 185°	24,2	21,8	45,5	56,9	63,5	66,8
13 „ „ „ „ 185°	22,9	20,9	46,2	59,7	68,1	71,8
10 Min. in geschm. Zinn „ 240°	22,2	20,4	**46,7**	61,0	70,2	74,3
1 „ „ „ Blei „ 330°	19,0	19,0	46,7	68,0	83,7	90,0
1 Std. „ „ Zink „ 420°	16,2	14,4	40,1	**72,6**	**93,6**	**103,9**
Ausgeglüht	14,9	4,3	10,2	18,7	29,8	42,4

Die Ergebnisse stimmen mit den von Ruths[1]) erhaltenen überein, der bei Benutzung einer anderen Stahlsorte fand, dass für kurze Magnete ($\delta = 20$) die spezifische Magnetisirung in glashartem Zustaude 51 betrug und auf 28,4 beim Anlassen auf blau fiel, während bei langen Magneten ($\delta = 70$) die spezifische Magnetisirung, die bei glashartem Zustand 68,7 betrug, auf 92 beim Anlassen auf blau stieg.

Stand des Anlassens	Härte	Mittlere spezifische Magnetisirung $\delta = 10$	$\delta = 20$	$\delta = 30$	$\delta = 40$	$\delta = 50$
Glashart	45,7	23,5	37,6	43,6	46,5	48,3
Strohfarben	26,3	21,4	40,2	49,4	53,8	56,5
Blau	20,5	19,3	45,8	67,0	80,4	87,3
Ausgeglüht weich	15,9	4,3	11,2	20,5	31,8	44,6

Aus den angeführten Untersuchungen, so wichtig sie auch sind, geht nicht hervor, welcher Zustand des Anlassens eine

1) Ruths. Über den Magnetismus weicher Eisencylinder und verschiedener harter Stahlsorten. Dortmund 1876.

Digitized by Google

Magnetisirung von grösster Constanz hervorbringt. Diese werthvolle Eigenschaft, der Scoresby[1]) den Namen „Beständigkeit" gab, kann nicht durch Betrachtung der Werthe der Coercivkraft vorher bestimmt werden, wie sie in der Tabelle auf S. 341 gegeben sind, weil die Werthe mit der Zeit sich ändern. Scoresby fand dadurch eine Methode, dass er die Änderung des Magnetismus prüfte, der hervorgebracht wurde, wenn er den Magnet sanft auf die gleichen Pole eines anderen und kräftigeren Magnetes legte. Er nahm als Maass der Güte eines Magnetes (für Kompassnadeln) das Product aus seiner ursprünglichen Stärke mit der nach solcher Behandlung ermässigten Stärke. Bei der Behandlung ergab sich, dass für Magnete, (12,5 cm lang, 1,25 cm breit und von 1,25 bis 0,16 cm dick) die Procentzahl der Ermässigung in hartem Gussstahl am geringsten war, geringer bei durchweg blau angelaufenem, nicht nur an den Enden angelassenem Stahl. Kater[2]) fand, dass es für Kompassnadeln aus dünnem Stahl vortheilhaft ist, die Mittelstücke weicher zu machen und nur die Enden hart zu lassen.

In Betreff der Frage wegen Anlassens und chemischer Zusammensetzung sind in neuerer Zeit viele wichtige Thatsachen bekannt geworden. Es scheint, dass Eisen in zwei verschiedenen oder allotropen Zuständen bestehen kann, ebenso wie Kohle sowohl als weicher Graphit oder harter Diamant vorkommt. In einem dieser beiden Zustände ist auch Eisen hart, im anderen weich. Ferner unterscheidet sich die Art, in der Kohle im weichen Stahl vorkommt, von der Art, in der sie sich im harten Stahl vorfindet. Nach Sir F. Abel[3]) besteht im weichen, kalt gewalzten Stahl die Kohle als eine Eisenverbindung von der chemischen Zusammensetzung $Fe_3 C$. Diese ist durch den Stahl in perlenartigen Massen vertheilt und lässt sich mittels des Mikroskopes finden. Wenn man solchen Stahl zu heller Rohglut erhitzt und rasch abkühlt, wird er sehr hart; dann findet man, dass die Kohle sich in der Masse gelöst hat und nicht mehr in Flocken sichtbar wird. Wird der Stahl durch Wiedererhitzen auf Temperaturen zwischen 200 und 400° erweicht, so sondert sich die Kohlenverbindung wieder langsam in Flocken innerhalb der Masse; der Grad der Sonderung hängt von der Temperatur, der Dauer ihrer Anwendung und der mechanischen Behandlung während

1) Scoresby, Magnetical Investigations. Bd. I S. 35.
2) Bakerian Lecture (Phil. Trans) 1821.
3) Proc. Inst. Mech. Engineers Jan. 1883.

Digitized by Google

solcher Erhitzung ab. Im Jahre 1868 zeigte Chernoff, dass Stahl nicht durch plötzliches Abkühlen gehärtet wird, wenn er nicht vorher bis zu einem gewissen bestimmten Grade, ungefähr 650° C., erhitzt wird. Im Jahre 1869 entdeckte Gore, dass bei der Abkühlung eines hellroth glühenden Eisendrahtes, ein Augenblick eintritt, in dem er sich plötzlich verlängert, worauf bei der ferneren Abkühlung Zusammenziehung stattfindet. Barrett fand, dass bei Abkühlung des Drahtes bis zu einem gewissen Grade, er plötzlich heller glüht. Dieser Erscheinung gab er den Namen „Recalescence". Tait hat gezeigt, dass es eine gewisse hohe Temperatur gibt, bei der Eisen einer merkwürdigen und plötzlichen Änderung in seinem thermoelektrischem Verhalten unterliegt. Noch vor einiger Zeit hat Osmond bei Untersuchung der Abkühlung heisser Eisen- und Stahlproben beobachtet, dass es zwei Temperaturpunkte gibt, an denen Wärme während der Abkühlung entwickelt wird.

Während der raschen Abkühlung geht die Kohle aus dem Zustande, in dem sie mit dem Eisen verbunden ist, in einen anderen, in dem sie im Eisen aufgelöst wird, über; bei langsamer Abkühlung kann die aufgelöste Kohle jedoch wieder in Verbindung mit dem Eisen treten und zu dem Zustande der Weichheit zurückkehren. Nach Osmond entspricht der zweite Temperaturpunkt, bei dem Wärme entwickelt und bei dem der Temperaturabfall momentan aufgehalten wird, dem Punkte der Recalescenz nach Barrett; er glaubt, dass, wenn während der Abkühlung dieser Wärmegrad erreicht wird, die Kohle den Zustand der Lösung verlässt und sich mit dem Eisen verbindet, wobei Wärme entwickelt und das zeitweilige Glühen auf der Oberfläche veranlasst wird. Sogar bei reinem Eisen tritt der eine Haltepunkt im Abfall der Temperatur ein. Hier ist aber keine Kohle vorhanden; die Erscheinung rührt von einer Eigenschaft im Eisen selbst her. Osmond erklärt dies folgendermassen. Bei der hellrothen Glühhitze sind die Eisenatome so in Molekülen angeordnet, dass das Eisen wirklich hart ist; es ist aber noch eine zweite Anordnung möglich, bei der das Eisen weich wird. Osmond nennt die erste oder harte Art β Eisen und die zweite oder weiche Art α Eisen. Ist das Eisen rein, so wird es bei Abkühlung aus dem β in den α Zustand übergehen, gleichgültig ob die Abkühlung rasch oder langsam erfolgt. Wenn aber Kohle vorhanden ist, wird ein gewisser Procentsatz Moleküle in dem β Zustande zurückgehalten, wodurch der Stahl hart wird. Nach Osmond tritt Änderung in den Molekülen bei dem höheren Punkte

Digitized by Google

in der Abkühlung ein; darauf folgt der Punkt, wo die Kohle aus dem Lösungszustand (härtende Kohle) sich in den Zustand der Vereinigung verändert. Den höheren Punkt findet man bei 770°, den tieferen ungefähr bei 650°. Wenn also zwischen diesen Temperaturen Stahl plötzlich abgekühlt wird, so sollte der Eisentheil weich, aber der Kohlentheil nicht mit ihm verbunden sein. Dies trifft zu, da man bei der Ausscheidung des freien Eisens keine Verbindung der Kohle findet. Durch mechanische Bearbeitung bei Temperaturen unterhalb einer kräftigen Rothgluth kann ferner das α Eisen allmählich in β oder hartes Eisen verwandelt werden, wie es thatsächlich auch geschieht, wenn Eisen gewalzt, gehämmert oder gezogen wird. Diese Änderungen stehen offenbar im Zusammenhange mit den magnetischen Eigenschaften des Materials. Untersuchungen über den Zusammenhang sind von Tomlinson, Hopkinson, Roberts-Austen und anderen angestellt worden. Es könnte scheinen, als ob bei Temperaturen über der tieferen jener beiden Punkte Eisen nicht magnetisirbar ist, und als ob nur unterhalb des tieferen Punktes das Eisen Magnetismus annehmen und festhalten kann. In jedem Fall scheint die Temperatur der Recalescenz der kritischen Temperatur für die Magnetisirung zu entsprechen. Träfe dies zu, so lässt sich folgern, dass das β (oder harte) Eisen an sich nicht magnetisirt werden kann. Eine Thatsache unterstützt diese Ansicht, nämlich dass durch Zusatz eines geringen Procentsatzes Mangan zum Eisen sogenannter Manganstahl hervorgebracht wird, der nicht nur ungewöhnlich hart, sondern auch nicht magnetisirbar ist. Sieben Procent Mangan genügen, um zu verhindern, dass das Eisen aus dem β Zustand in den α Zustand übergeht.

Magnetisirungsmethoden.

Die früheren Magnetisirungsmethoden einschliesslich des einfachen, doppelten, getheilten und Bogenstrichs mit allen ihren Abarten können als veraltet übergangen werden. Die einzigen der Aufmerksamkeit werthen Methoden gründen sich auf den Gebrauch elektrischer Ströme. Arago entdeckte diese Art der Magnetirung im Jahre 1820 und magnetisirte Stahlnadeln, indem er sie in eine spiralige mit einer Voltabatterie verbundene Wickelung legte. Elias in Haarlem schlug im Jahre 1844 eine nützliche Abänderung des Verfahrens vor. Anstatt den Draht als lange röhrenförmige Spule zu wickeln, wand er ihn zu einem festen Ringe in vielen Lagen auf, der lose über das magnetisirende

Digitized by Google

Stahlstück gezogen werden konnte und dann von Ende zu Ende über das Stahlstück entlang bewegt wurde, sodass alle Theile nach einander in ein kräftiges magnetisches Feld gelangten. Im Jahre 1846 gab Böttcher eine Abänderung für hufeisenförmige Magnete an. Zwei entgegengesetzt gewickelte Spulen sollten gleichzeitig über beide Polenden gezogen werden. Sinsteden benutzte zur Magnetisirung hufeisenförmiger Stücke einen kräftigen zweipoligen Elektromagnet, gegen dessen Polenden das Stahlhufeisen gelegt wurde; in dieser Lage wurde das Hufeisen in der Richtung von der Biegung nach den Polen zu mit einem Eisenanker, der quer über den Schenkeln sich befand, gestrichen. Van der Willigen beschrieb in seinem Aufsatz[1]) über Magnete, die von Van Wettern geschmiedet waren, die für jene berühmten Magnete benutzte Methode. Das Stahlhufeisen wird mit seinen Polen gegen die Polstücke eines Ruhmkorff'schen Elektromagnetes (vgl. Fig. 28) gelegt, der Strom aus 10 oder 20 Bunsenelementen wird 3 oder 4 Mal geschlossen und unterbrochen. Wenn der Strom unterbrochen ist, so wird das Hufeisen senkrecht gestellt und der Anker quer über die Pole gelegt, bevor diese von dem Elektromagnet getrennt werden. Der Magnet befindet sich dann in übersättigtem Zustande, hängt an seinem Anker mit einer nahezu 30% grösseren Kraft, als dem gewöhnlichem von ihm ausgeübten Zuge. Für grössere Magnete bediente sich Van der Willigen des Ruhmkorff'schen Elektromagnetes und eines Elias'schen Ringes, den er hin und her von einem Ende zum andern über das Hufeisen 20 bis 30 Mal gleiten liess, während gleichzeitig der Elektromagnet in Wirksamkeit war.

Für kleine Stabmagnete und Compassnadeln genügt es, sie über die Pole eines grossen Elektromagnetes zu ziehen, jedes Ende des Stahlstückes muss auf dem entgegengesetzten Pol gestrichen und gleichmässig abgezogen werden. Für gerade Stäbe von beträchtlicher Grösse benutzte Van der Willigen denselben Elektromagnet, indem er die Entfernung zwischen den Polflächen dem zu erregenden Stabe anpasste und dann dasselbe Verfahren wie bei Hufeisen, natürlich ohne den Anker anzuwenden, beobachtete. Eine als Hoffer's Methode bekanntes Verfahren besteht darin, dass man das Stahlhufeisen von den Polen nach der Biegung zu mit einem Eisenstab streicht, der quer über den Schenkeln liegt,

1) Van der Willigen, Sur le Magnetisme des Aimants artificiels. (Archives du Musée Teyler, Haarlem, Bd. IV. 1878).

Digitized by Google

während er mit den Polen eines anderen magnetischen Hufeisens in Berührung steht. Van der Willigen, der diese Methode prüfte, fand sie fehlerhaft und sogar schädlich. Sie erzeugt Ungleichheiten in der Vertheilung des Magnetismus und vermindert die wirksame Kraft von Magneten, die, wie oben beschrieben, erregt worden sind.

Ein anderes Verfahren, das man zu verschiedenen Zeiten als Verbesserung der gewöhnlichen Methoden angesehen hat, gründet sich darauf, dass man den Magnet während der Dauer des Härtens starken magnetisirenden Kräften aussetzt. Robinson legte die Stahlstäbe rothglühend gegen die Pole eines starken Magnetes; in dieser Lage wandte er kaltes Wasser bei dem Stabe an. Nach Holtz[1]) sollen dicke Stahlstäbe, die so während plötzlicher Abkühlung erregt werden, zweimal so kräftig wie die sein, die kalt erregt worden sind, dünne Stäbe sollen sogar dreimal so kräftig werden. Aimé und Hamann haben diese Methode auch vertheidigt, sie scheint jedoch keinen greifbaren Nutzen ergeben zu haben.

Moser[2]) machte einen Vergleichsversuch mit den verschiedenen Methoden, die er auf einen parallelopipedischen Stahlstab im Gewicht von 340 *g* anwendete. Er bestimmte den Grad der Magnetisirung nach der Schwingungsmethode, indem er die Zeit beobachtete, die für eine vollständige Schwingung erforderlich war. Aus der Dauer der Schwingung lassen sich die zugehörigen Werthe der Stärke berechnen. Die Ergebnisse von acht Methoden, von denen die nächste besser als die vorhergehende ist, sind in der Tafel zusammengestellt.

Diese Versuche lassen keinen Zweifel darüber aufkommen, dass die neue Methode den älteren überlegen ist.

Ewing benutzte bei seiner Untersuchung über die Magnetisirung des Eisens in sehr starken magnetischen Feldern einen grossen Elektromagnet. Zwischen die Pole des Magnetes brachte er das zu magnetisirende Probestück; dasselbe war nach der Mitte hin dünn abgedreht, so dass ein enger Hals zwischen zwei konischen Theilen gebildet wurde. Auf diese Weise konnte eine erhebliche Zahl Kraftlinien in dem engen Theile zusammengedrängt

1) W. Holtz. Über die Magnetisirung des Stabes während der Härtung. Wiedemanns Ann. S. 71. 1879.

2) Dove's Repertorium der Physik Bd. II S. 141. 1838.

Digitized by Google

werden. Auf diesem Wege fand Ewing den Rückstandswerth J zu ungefähr 500 für Schmiedeeisen.

	Zeit einer Schwingung	Relative Stärke
	Sek.	
1. Knight's Methode mit „getheiltem Strich" bei Verwendung von zwei Dauermagneten, 20 Striche nach jeder Seite des Stabes.	22,13	1
2. dieselbe, wiederholt auf allen vier Seiten	14,87	2,21
3. dieselbe, mit Anwendung von Eisenmassen unter jedem Ende des Stabes.	14,63	2,29
4. dieselbe wiederholt, während der Stab auf die Spitze eines umgekehrten Stahlmagnetes gelegt wurde.	12,13	3,33
5. Michell's Methode des „Doppelstrichs" bei Verwendung von zwei besonderen Stahlmagnetstäben.	11,13	3,95
6. dieselbe, bei Anwendung eines Stahlhufeisens.	10,19	4,71
7. Methode des „Kreisstrichs" von Aepinus bei Verwendung desselben Hufeisens.	8,75	6,39
8. Mit einem Elektromagnet: den Stab auf zwei eiserne Polstücke an den Polen des Elektromagnetes gelegt und hierbei mit einem Stahlhufeisen gestrichen; den Strom dann unterbrochen und den Stab abgehoben.	8,0	7,62

Beständigkeit der Magnete.

Der Magnet, der den grössten Werth an Dauermagnetismus aufweist, ist keineswegs auch der Beständigste im Festhalten desselben. Magnete verlieren ihren Magnetismus aus verschiedenen Ursachen, z. B. durch zufällige Schläge, durch Berührung mit anderen Magneten oder Eisenstücken, Änderungen der Temperatur, durch langsames Ausglühen und dgl. Die Beziehung dieser Einflüsse zur Güte und Weichheit des Stahles und zu den Abmessungen des Magnetes sind nicht sehr bekannt, doch fehlt es nicht an dieser Kenntniss.

Gray[1]) fand bei Verwendung glasharter Magnete, dass der Procentsatz des von einer kleinen entmagnetisirenden Kraft (der

1) Phil. Mag. XX S. 484. 1885.

Digitized by Google

Einheit des Feldes) herrührenden Verlustes an Magnetismus für Magnete verschiedener Länge sehr schwankte. Ein Stab von einer Länge gleich dem zehnfachen Durchmesser verlor 0,8%, von einer Länge gleich den 20 fachen Durchmesser 0,6%, ein weiterer von einer Länge gleich dem 40 fachen Durchmesser 0,5%, während einer von 100 Durchmessern Länge nahezu 0,44% verlor.

Bosanquet[1]) benutzte eine beträchtliche Zahl Magnete (am 8. Februar 1885) aus bestem Gussstahl und so hart wie möglich hergestellt. Es fand den folgenden Abfall der magnetischen Momente.

18. Februar	12539
3. März	11822
15. März	11767
8. April	11620
18. September	11119

Lamont[2]) führte elf Jahre hindurch eine Untersuchung über die Beständigkeit der im Observatorium zu München zu den täglichen magnetischen Messungen benutzten Magnete. Diese Magnete waren schon wiederholt in warmes und kaltes Wasser abwechselnd getaucht worden, hatten aber durch solche Behandlung den Zustand der Beständigkeit nicht erreicht, wie die folgenden Zahlen zeigen. Die Verluste sind in Decimaltheilen des ganzen magnetischen Moments angegeben.

	1848	1849	
Januar	0,0000	0,0000	
Februar	0,0003	0,0001	
März	0,0003	0,0002	
April	0,0008	0,0005	
Mai	0,0014	0,0007	
Juni	0,0022	0,0011	
Juli	0,0028	0,0016	
August	0,0032	0,0022	
September	0,0028	0,0022	
October	0,0017	0,0013	
November	0,0009	0,0007	
December	0,0005	0,0001	

1) Phil. Mag. XIX S. 57. 1885.

2) Lamont's Handbuch des Magnetismus. 1887 (Seite 410).

Digitized by Google

Die Gesammtabnahme in verschiedenen Jahren in Werthen des ganzen magnetischen Moments als Einheit war folgende.

1847	0,0174	1853	0,0099
1848	0,0169	1854	0,0103
1849	0,0103	1855	0,0081
1850	0,0091	1856	0,0079
1851	0,0113	1857	0,0071
1852	0,0079	1858	0,0063.

Nach Angabe von Barus[1]) bringt die mittlere Lufttemperatur, die auf frisch abgelöschten Stahl in einer Periode von Jahren einwirkt, eine Verminderung der Härte mit fortgesetztem Verlust an Dauermagnetismus hervor, der ungefähr jenem gleicht, den die Einwirkung einer Temperatur von 100° C. während einer gleichen Periode von Stunden veranlasst.

Man hat versucht, den langsamen Abfall des Magnetismus durch chemische Änderungen der Oberfläche zu erklären, die von Oxydation, Feuchtigkeit und dgl. herrühren sollten, und deshalb vorgeschlagen, dem Abfall durch Vergolden, Versilbern oder Lackiren der Oberfläche vorzubeugen Solche Mittel sind ganz unwirksam und die Vorraussetzung, auf die sie sich gründen, ist irrig.

Cheesman beobachtete den Procentsatz des durch Erschütterung verursachten Verlustes an Magnetismus. Man liess die Magnete aus einer Höhe herabfallen. Die Ergebnisse waren folgende:

Brand und Härtegrad	Fallhöhe *m*	Procente des Verlustes an Magnetismus
Stahldraht, weich	1,5	30
„ mechanisch gehärtet	2,0	44
„ „ „	3,0	57
Stahlstab „ „	2,0	52
„ „ „	7 Mal desgl.	81
Eisendraht „ „	2,0	84
„ „ „	3 Mal desgl.	95
„ weich	2,0	83
„ „	3,0	99
Eisenstab, „	2,0	97
Stahldraht, glashart	2,0	6
„ „	3,0	4

1) Phil. Mag. Nov. 1888. S. 403.

Digitized by Google

W. Brown[1]) benutzte 20 cm lange, aus Silberstahl gefertigte Magnete und bemühte sich, eine Beziehung zwischen dem Härtegrad der Magnete und dem Procentsatze des Verlustes an Magnetismus zu finden, den die Erschütterung verursacht, nachdem die Magnete verschiedene Zeitabschnitte bei Seite gelegt gewesen waren. Seine Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle enthalten, aus der zu ersehen ist, dass der glasharte Zustand der beständigste zu sein scheint. Weniger sicher ist zu erkennen, ob lange Magnete beständiger als kurze sind.

Härtegrad	Durchmesser verhältniss δ	Specifische Magnetisirung σ	Verlust in Procenten durch Erschütterung veranlasst, nach einem Zeitraum von				
			1 Std.	20 Std.	44 Std.	1 Monat	3 Monaten
Glashart	33	41	1,98	2,0	1,95	1,04	0,8
„	50	45	2,96	3,2	1,48	1,0	0,0
Gelb	33	44	6,03	6,1	4,8	5,4	6,2
„	50	46	4,0	3,5	3,76	2,6	4,0
Blau	33	54	11,8	10,8	0,71	11,8	7,5
„	50	71	8,2	8,2	8,18	7,5	8,7

Strouhal und Barus, die so viele Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften von Stahl angestellt haben, untersuchten die Frage wegen Beständigkeit von Magneten in Beziehung zur Form, zum Härtegrad und zur Einwirkung von Temperaturschwankungen. Sie fanden, dass ein glasharter Magnet, dessen Länge gleich dem 119 fachen Durchmesser war, 30 % seines Magnetismus verlor, wenn man ihn 6 Stunden lang in Dampf von 100° C. erhitzte, dass derselbe Magnet nach Wiedererregung, und nachdem er wiederum in Dampf erhitzt wurde, nur 5,3 % verlor. Es stellte sich heraus, dass der Verlust beim ersten Erhitzen für Magnete verschiedener Länge schwankte.

Ein Magnet von einer Länge gleich dem 119 fachen Durchm. verlor 30 %.
„ „ 108 „ „ 28 „
„ „ 35 „ „ 49 „
„ „ 14 „ „ 67 „

In jedem Falle wurde nach verlängertem Erhitzen in Dampf ein Zustand geschaffen, bei dem weder die specifische Magnetisirung noch der specifische Widerstand (d. h. Härte elektrisch

1) Phil. Mag XXIII. S. 293. 1887.

Digitized by Google

gemessen) irgend eine bemerkbare Aenderung zeigten. Diese Forscher kamen zu dem Schlusse, dass so behandelte Magnete eine besondere Beständigkeit besitzen, und nicht allein Temperaturänderungen, sondern auch mechanischen Schlägen besser als auf anderem Wege hergestellte Magnete widerstehen. Sie nahmen z. B. einen kurzen Magnet, 2,5 cm lang, 0,4 cm breit und 0,3 cm dick, kochten ihn 4 Stunden, magnetisirten und hielten ihn zwei Stunden länger in Dampf. Sie bestimmten sein magnetisches Moment, legten ihn auf einen Holzklotz und führten 50 heftige Schläge auf ihn aus, sowohl längs als seitwärts mit einer anderen Holzmasse. Er zeigte dann eine Verminderung von nur $\frac{1}{900}$ und nach Wiederholung des Schlagens nur einen Verlust von nahezu $\frac{1}{400}$. Bei einem anderen Versuche wurde ein röhrenförmiger Stahlmagnet glashart gemacht, magnetisirt und 30 Stunden lang in Dampf erhitzt, wieder magnetisirt und 10 Stunden in Dampf erhitzt. Wenn dieser Magnet 10 Mal auf seine Enden aus einer Höhe von 1,5 m fiel, zeigte er eine Abnahme von nur $\frac{1}{4756}$ seines Magnetismus. Demgemäss sollten alle zum Gebrauche in magnetischen Observatorien zu verwendende Magnete in folgender Weise hergestellt werden: „Man macht die Magnete glashart, bringt sie in Dampf von 100° C. 20 bis 30 Stunden oder noch längere Zeit bei sehr starken Magneten; dann magnetisirt man so kräftig als möglich und erhitzt sie von Neuem 5 (oder mehr) Stunden in Dampf.“ Solche Magnete werden so beständig sein, wie man sie überhaupt herstellen kann.

Auf andere Weise hat G. Hookham[1]) Magnete von beständiger Kraft zur Benutzung für seine elektrischen Messinstrumente zu erlangen gesucht. Eine Anzahl Magnetstäbe aus Wolframstahl werden in gusseisernen nahe aneinander stehenden Polstücken eingepasst, so dass sie einen fast geschlossenen Kreis bilden. Dann sendet man einen Erregerstrom um die Magnetstäbe, und sättigt sie so viel als möglich. Darauf werden sie gehämmert, dann wird ein schwacher entmagnetisirender Strom durch die Spule gesendet, der den Magnetismus um ungefähr 10% herabsetzt. Der Magnet wird nunmehr viele Monate hindurch

1) Journal Institution Electrical Engineers Bd. XVIII S. 688 1889.

Digitized by Google

keine Neigung zur Abschwächung zeigen, er wird im Gegentheil etwas zunehmen.

Wirkungen der Temperatur.

Ausser den Wirkungen des Anlassens und des Ausglühens des Stahles bringt die Wärme verschiedene Wirkungen auf den Magnetismus hervor.

Den Einfluss auf zeitweilige Magnetisirung von Eisen und Stahl findet man im Kapitel III; einige Punkte über Dauermagnetismus sind jedoch noch zu erwähnen.

Faraday[1]) fand, dass ein Stahlmagnet seinen Magnetismus bei einer wenig niedrigeren Temperatur als dem Siedepunkte von Mandelöl verlor; von jenem Punkte aufwärts verhielt er sich wie weiches Eisen, bis er zur orange Rothglut erhitzt wurde, bei der alle magnetischen Eigenschaften verschwanden. Ein Stück Magneteisenstein behielt seinen Magnetismus bis eben unter kräftiger Rothglut.

Beim Gebrauch einer starken Kältemischung von Kohlensäureschnee in Äther gelöst, die bis ungefähr 140° C. abzukühlen im Stande ist, fand Trowbridge[2]), dass die Wirkung äusserster Kälte den Magnetismus eines Stahlmagnetes um 60% verminderte. Dewar findet indessen, dass diese Wirkung nur bei stark gesättigten Magneten hervorgebracht wird. Eine sehr starke Abkühlung übt auf einen nicht bis nahe zur Sättigung gebrachten Magnet die entgegengesetzte Wirkung aus. Wurde ein mässig magnetisirter Stahlmagnet unter Anwendung von flüssigem Sauerstoff bis auf —200° C. abgekühlt, so zeigte er eine Zunahme seines Magnetismus von fast 50%.

Wiedemann[3]) kam zu dem Schlusse, dass der Magnetismus, wenn die Temperatur des Magnetes wiederholt geändert und auf ihren Anfangswerth zurückgebracht wurde, allmählich einen dauernden Zustand erreicht, nach dem jede Erhöhung der Temperatur in sehr harten Stahlstäben eine Zunahme, in weichen Stahlstäben aber eine Abnahme des Magnetismus verursacht. Eine Abnahme der Temperatur liefert entgegengesetzte Ergebnisse. Diese Erscheinung ist in gewissem Sinne verwickelt. Beim Erhitzen eines Magnetes und danach folgendem Abkühlen wird der

1) Experimental Researches II S. 220.
2) Silliman's Journal 1881.
3) Pogg. Ann. CIII S. 563. 1858.

Digitized by Google

während des Erbitzens verlorene Magnetismus nur theilweise während des Abkühlens wiedergewonnen, so dass bei jeder Wiederholung des Erhitzens etwas Verlust eintritt, bis der stetige Zustand erreicht worden ist. Aber die Erscheinungen sind von der früheren magnetischen Entwickelung des Stabes abhängig, diese mag dann die Umstände verwickelt machen. Wenn z. B. ein Stab magnetisirt und lange Zeit zurückgelegt oder mechanischen Schlägen ausgesetzt wird, und dann von Neuem einer etwas entmagnetisirenden Kraft, die nur während kurzer Zeit gewirkt hat, unterworfen wird, so kann ein solcher Stab beim Erhitzen und Abkühlen wirklich mehr Magnetismus beim Abkühlen wiedergewinnen, als er beim Erhitzen verloren hat. Er verhält sich dann so, als ob er zwei unabhängige übereinander gelagerte Magnetisirungen besässe, die verschiedene Temperatur-Coefficienten haben.

Für gewöhnliche Stahlmagnete kann man als richtig annehmen, dass die gewöhnlichen Temperaturänderungen der Luft geringe Änderungen vorübergehender Art hervorbringen. Die im Kew Observatorium benutzte Formel für Temperaturberichtigungen wurde von Whipple wie folgt bestimmt.

$$K_t = K_0 [1 - q (t - t_0) - q_1 (t - t_0)^2];$$

wobei die mittleren Werthe von q und q_1 0,000161 und 0,00000048 betragen. Christie fand für den Coefficienten q 0,001015, Hansteen 0,000788, Riess und Moser für Compassnadeln 5—7,5 *cm* lang den Werth 0,000324 bis 0,000432. Cancani fand bei cylindrischen Stahlmagneten von 50 *mm* Länge bei einem Durchmesser von 1 *mm* $q = 0{,}000312$; 2 *mm* Durchmesser $q = 0{,}000380$; 3 *mm* Durchmesser $q = 0{,}000539$; 4 *mm* Durchmesser $q = 0{,}000645$; 5 *mm* Durchmesser $q = 0{,}000869$. Der Temperaturcoefficient blau angelassener Magnete war nahezu 50% grösser als der von strohfarben angelaufenen. Ewing fand, dass das magnetische Moment eines Stahlstabes ungefähr $18^1/_2$% beim Erhitzen von 10° auf 100° abfiel, aber dass es beim Abkühlen wieder erlangt wurde. Gaugain[1]) machte ebenfalls viele Beobachtungen über den Einfluss der Wärme auf den Magnetismus.

Der Temperaturcoefficient von Magneten ist jedenfalls eine Funktion ihrer Gestalt, es scheint auch, dass Magnete von kurzer cylindrischer Form grosse Coefficienten besitzen, Magnete von

1) Comptes Rendus, 1877 und 1878.

Digitized by Google

mehr verlängerter Gestalt kleinere Coefficienten. Magnete, die so gestaltet sind, dass sie einen fast geschlossenen magnetischen Kreis bilden, haben Temperaturcoefficienten von nahezu Null, möglicherweise zeigen sie sogar einen negativen Werth. Diese Thatsache ist von sehr wesentlicher Bedeutung bei der Verwendung von Dauermagneten in Elektricitätszählern.

Verwendung geblätterter Magnete.

Knight scheint zuerst Magnete, die aus Bündeln von gesondert magnetisirten Stahlplatten hergestellt waren, benutzt zu haben. Seitdem ist diese Herstellungsart vielfach, vornehmlich von Coulomb und Scoresby angewendet worden. Der Vortheil besteht darin, dass bei den zum Härten von Stahl durch plötzliches Abkühlen angewendeten Methoden das Härten wirklich nicht weit unter der Oberfläche vor sich geht und folglich der innere weichere Theil des Stabes Nichts zum Dauermagnetismus beiträgt, ihn sogar schwächen kann, soweit seine äussere Wirkung in Betracht kommt. Coulomb benutzte Magnete aus 3 Blättern, von denen das mittlere ein wenig über die anderen hervorragte, ihre Enden waren in einem Polstück aus weichem Eisen gebettet. Scoresby[1]) der viele Untersuchungen über zusammengesetzte Magnete anstellte, zeigte, dass eine Trennung der Blätter auf geringen Abstand zweckmässig sei. Einige seiner Magnete aus Stahl werden im Museum zu Whitby aufbewahrt. Scoresby bewies auch, dass solche Magnete viel stärker gemacht werden können, als ein Einzelstab von gleichem Gewicht, dass aber der absolute Gewinn an Kraft in der vereinigten Masse der von jedem einzelnen Blatte rührt, fortschreitend sich vermindert. In einem Satze von 30 Platten bringen z. B. die letzten 26 Platten zu den ersten 4 nicht mehr magnetische Kraft hinzu als die ersten 6 allein besitzen würden. Dies ist die Folge des Betrebens der gegenseitigen Entmagnetisirung, denn in einem kräftigen Satze fügen die schwächern Platten nicht nur Nichts hinzu, sondern erhalten durch die stärkeren Platten thatsächlich umgekehrte Polarität. Theilweise hilft man diesem Übelstande dadurch ab, dass man die Berührung der Platten verhindert. Scoresby fand, dass für zusammengesetzte Hufeisenmagnete der beste Härtegrad nicht der glasharte Zustand war. Er hielt es für besser, die harten Stahl-

1) Scoresby's Magnetical Investigations Bd. I, S. 98—329.

Digitized by Google

platten durch Kochen in Leinöl bei 505° F. (= 263° C.) zu behandeln. Auf diese Weise steigerte er die Tragkraft eines fünfplattigen Stahlhufeisenmagnetes im Gewicht von 1,3 *kg* von 5,9 *kg* auf 11,3 *kg*. Ein anderer fünfzehnplattiger Magnet von 3,6 *kg* Gewicht, der glashart nur 11,8 *kg* tragen konnte, hob so behandelt 20,4 bis 22,7 *kg*.

Jamin[1]), der sich mit der gleichen Aufgabe befasste, hat wenig zu den sehr vollständigen Untersuchungen Scoresby's hinzugefügt. Einige Fabrikanten von zusammengesetzten Magneten ordnen die Plattenreihen stufenartig an den äusseren Enden an; die mittleren Platten werden etwas länger als die an jeder Seite gemacht. Bei dieser Anordnung, die verhüten soll, dass die mittleren Platten durch die aussen gelegenen in ihrer Polarität umgekehrt werden, gewinnt man wenig Wahrscheinlich hat sie den Vortheil, die magnetischen Linien zusammen zu drängen und so zur Tragkraft beizutragen (Siehe Gesetz der Zugkraft S. 112—115). Van der Willigen sah einen Millimeter als genügende Grösse für das Hervorstehen der mittleren Platte an.

Tragkraft oder Hebekraft von Magneten.

Bernoullis Gesetz, dass die Zugkraft ähnlicher Magnete proportional der Wurzel mit dem Exponenten $^3/_2$ oder in anderen Worten dem Quadrate der Kubikwurzel ihres Gewichtes sei, ist auf S. 113 erklärt worden, ferner wurde die Bedeutung dahin erläutert, dass bei gleicher magnetischer Sättigung die Zugkraft der Polfläche proportional sei. Bezeichnet P die grösste vom Magnet getragene Last, W sein Eigengewicht, so heisst Bernoullis Regel

$$P = a \sqrt[3/2]{W}$$

wo a eine Constante bedeutet, die von den gewählten Einheiten, der Güte des Stahles und dem Grade der Magnetisirung abhängig ist. Sind P und W in Kilogrammen angegeben, so wird nach den Angaben der besten Fabrikanten a für Hufeisenmagnete zwischen 18 und 24 liegen oder im Durchschnitt 20 betragen. Das bedeutet, dass ein Magnet von 1 *kg* Gewicht, eine Last von 20 *kg* oder das Zwanzigfache seines Eigengewichts tragen wird.

1) Comptes Rendus, LXXII 1873 und viele Abhandlungen seitdem in derselben Zeitschrift.

Digitized by Google

Nach dieser Formel sollte ferner ein 10 *kg* schwerer Magnet 92,8 *kg* oder $9^1/_4$ Mal sein eigenes Gewicht tragen, wogegen ein 0,1 *kg* wiegender Magnet 4,31 *kg* oder 43 Mal sein eigenes Gewicht tragen würde.

Die Harlemer Magnete sind wegen ihrer bewundernswerthen Eigenschaften so gelobt worden, dass einige Bemerkungen am Platze sind. Logemann, der beständig von Elias berathen wurde, hat den Ruf der in Harlem gebauten Magnete begründet. Von ihm wurde van Wetteren, ein äusserst geschickter Schmiedemeister beschäftigt. Als später Funckler das Geschäft von Logemann fortführte, stellten van Wetteren und Funckler Magnete nach der Angabe von Elias her, bis im Jahre 1874 van der Willigen jene Methode der Magnetisirung durch die oben (S. 353) beschriebene Methode überholte und sie bei den von van Wetteren geschmiedeten Magneten anwendete. Über die besondere Art des verwendeten Stahles und die angenommenen Härtungs- und Anlassverfahren findet sich nichts Genaues in der sonst schätzbaren Denkschrift über diesen Gegenstand von van der Willigen[1]) erwähnt. Es wird über ungefähr 50 Magnete ein ausführlicher Bericht erstattet, ferner über die Last, die sie nach der Magnetisirung in verschiedener Weise und zu verschiedenen Zeiten trugen. Viele Magnete waren von der in Figur 211 abgebildeten Form.

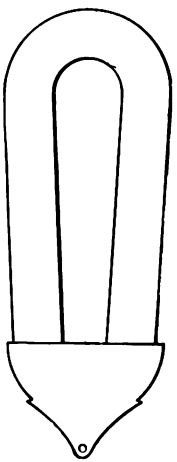


Fig. 211

Bezeichnung der Magnete	Gewicht in *kg*	Durchschnitts-Traglast in *kg*	Werth des Coefficienten *a*
A	0,495	13,30	21,25
B	0,487	11,78	19,03
E	0,889	19,02	20,57
3057	1,013	21,71	21,52
3053	1,521	27,90	21,17
3054	1,918	32,53	21,07
C	2,169	35,47	21,10

1) Sur le Magnetisme des Aimants artificiels. Arch. du Musée Teyler (Harlem) Bd. IV 1878.

Digitized by Google

Die Berührungsoberfläche des Ankers ist ein wenig abgerundet. Die Figur ist im Maasstabe von ein Viertel der natürlichen Grösse des Magnetes *A* in der vorstehenden Liste gezeichnet.

Der Magnet „*A*" war 0,66 *cm* dick, sein Anker 0,3 *cm* dick, die Polenden standen 2,57 *cm* weit auseinander, jedes war 2,68 *cm* breit. Die Höhe von der Aussenseite der Biegung bis zum Mittelpunkt zwischen den Polen betrug 17 *cm*. Die Polfläche betrug 1,769 *qcm*. Die grösste Weite zwischen den Schenkeln unterhalb der Biegung betrug 3,65 *cm*. Die Magnete *A*, *B*, *E* und *C* waren aus einem Stahlstabe hergestellt. Der Magnet 3053 war einer in der Ausstellung wissenschaftlicher Apparate in South Kensington im Jahre 1876 befindlichen, während der Magnet 3054 sich auf der Ausstellung in Philadelphia im selben Jahre sich befand. Als er im Mai 1877 aus Amerika zurückgesandt worden war, wurde er von Neuem magnetisirt und trug 31,44 kg.

Soweit dem Verfasser bekannt ist, kommt kein Britischer Fabrikant den Harlemern gleich, jedenfalls hat keiner sie übertroffen. Scoresby[1]) erwähnt, dass er einen neunplattigen Hufeisenmagnet von 9,98 *kg* Gewicht besitze, der zwischen 24,9 und 34,1 *kg* trage. Nach Bernoullis Formel würde ein etwa $^1/_2$ *kg* schwerer Magnet weniger als die Hälfte Tragkraft besitzen, wie ein Harlemer Magnet von gleichem Gewicht. Scoresby erwähnt ferner einen siebenplattigen von Dr. Schmidt hergestellten stählernen Hufeisenmagnet, Eigenthum der Royal Institution, der bei einem Gewichte von 7,3 *kg* nur 12,7 *kg* tragen könne. Wäre es ein Harlemer Magnet gewesen, so hätte er zum mindesten 68 *kg* tragen müssen.

Van der Willigen gab eine andere Formel für die Zugkraft der Harlemer Magnete, nämlich

$$P = B\,k\,\sqrt{S}\,\sqrt[4]{\frac{L}{S}\cdot\frac{L}{l}};$$

wenn *P* die Zugkraft in *kg*, *S* eine Poloberfläche (in *qcm*), *k* den Umfang des einen Polendes, *l* die wirkliche mittlere Länge des Hufeisens, *L* die „reducirte" Länge bedeutet, (d. h. die Länge zwischen den Punkten des Maximums des freien Magnetismus, an den Seiten des Magnetes mit anliegendem Anker beobachtet);

1) Op. cit. S. 244.

Digitized by Google

alle Angaben in *cm*. *B* ist ein Coefficient, der zwischen 0,7 und 1,2 schwankt und einen mittleren Werth von 0,891 besitzt.

Die Tragkraft von Stabmagneten ist natürlich viel geringer als die von Hufeisenmagneten von gleichem Gewicht, da der Anker nie so hoch magnetisirt wird, wenn er nur an einem Pole angelegt ist. Van der Willigen stellt fest, dass bei den Stabmagneten von van Wetteren, die von einem Pole getragene Last nur ein Viertel jener Last ausmacht, die ein Hufeisenmagnet von gleichem Gewichte des Stabmagnetes tragen würde. Das bedeutet, dass Bernoullis Coefficient *a* (für die *kg*-Einheit), zu ungefähr 5 für Harlemer Stabmagnete anzunehmen ist.

Behandlung der Magnete.

Alle Erfahrungen lehren, dass Magnete mit geschlossenem oder nahezu geschlossenem Kreise weniger leicht Änderungen der Stärke als andere Magnete unterworfen sind, deshalb versieht man die Hufeisenmagnete mit Ankern und ordnet Stabmagnete in Paaren oder „Magazinen“ an.

Temperaturänderungen und mechanische Schläge können, wie schon erwähnt wurde, den Magneten schaden.

Heftiges Aufschlagen des Ankers zerstört Magnetismus; der Anker sollte sanft angelegt werden, es ist sogar vorzuziehen, ihn quer über die Schenkel nahe der Biegung zu legen und dann nach den Polen zu zu ziehen. Plötzliches Abreissen des Ankers ist für einen Hufeisenmagnet von Vortheil, obwohl vielfach das Gegentheil geglaubt wird. Die in den polaren Massen bei plötzlicher Entfernung des Ankers inducirten Wirbelströme fliessen in solcher Richtung, dass sie den Magnetismus zu verstärken suchen. Man kann die Kraft eines Hufeisenmagnetes um mehrere Procent durch sanftes Aufgleiten des Ankers, wie oben erwähnt, und plötzliches wiederholtes Abreissen der Ankers verstärken. Andrerseits ist es leicht, die magnetische Güte um mehrere Procente zu verschlechtern, wenn man den Anker wiederholt stark anschlagen und dann ihn an der Biegung leise abgleiten lässt.

Stabmagnete für magnetische Messungen sollten nie mit einander oder irgend einem andern Magnet oder einem Eisenstück in Berührung kommen.

Unipolare Magnete.

Magnete mit nur einem Pol lassen sich nicht herstellen, es ist aber leicht, ein dieser Bedingung gleichkommendes Ergebniss

Digitized by Google

zu erreichen. Es möge ein Pol, etwa der Südpol, so angeordnet sein, dass er in einer Umlaufaxe liegt, wobei der Magnet durch ein Gegengewicht *c* im Gleichgewicht erhalten wird; dann wird er so wirken, als ob nur ein Nordpol vorhanden wäre. Das Gegengewicht kann passend aus einem Stück mit Kork gefütterter Bleiröhre hergestellt werden, die längs eines Messingarmes gleitet. Zwei Formen von unipolaren Magneten sind in Figur 212 abgebildet.

Astatische Anordnungen.

Durch passende Anordnungen kann man eine aufgehängte Magnetnadel, die sich unter dem richtenden Einfluss des Erdmagnetismus drehen und einstellen wird, so einrichten, dass sie keine solche Neigung zeigt, und dem erdmagnetischen Einfluss zeitweilig entzogen wird. Eine solche Anordnung nennt man astatisch. Es gibt verschiedene Arten derselben.

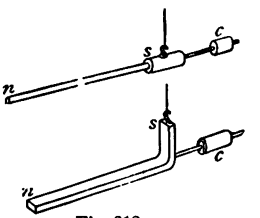


Fig. 212.

1. Verwendung eines Compensationsmagnetes. Ein zur Nadel parallel, östlich oder westlich, wie Figur 213 andeutet, oder am Ende nördlich oder südlich breitseits gelegter Stabmagnet kann zur Abgleichung der Wirkung des Erdfeldes verwendet werden. Befindet sich der Magnet weit entfernt, so wird er nicht kräftig genug wirken. Es wird sich ein Punkt *P* finden, wo die Nadel, wenn der Magnet näher gerückt wird, sich vollständig herumdreht. Steht der Ausgleichsmagnet in diesem Punkte, so wird eine kleine Änderung seiner Lage einen grossen Einfluss auf die Nadel ausüben. Es ist besser, den Ausgleich mit einem grossen Magnet in einiger Entfernung als mit einem kleinen Magnet dicht neben der Nadel zu bewirken.

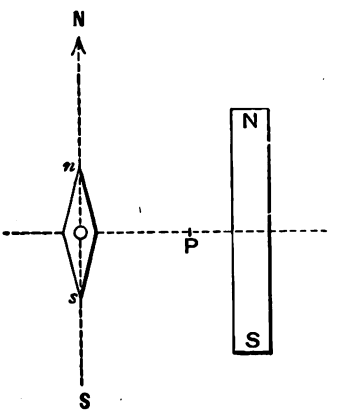


Fig. 213.

2. Schirmwirkung durch Eisen. Eine andere Methode besteht darin, die Nadel mit einem Eisenmantel von passender Dicke abzuschirmen.

3. Drehbare Aufstellung in der Inclinationslinie. Arago lagerte eine Compassnadel drehbar so, dass die Drehungsaxe parallel zur Inclinationsebene war. In diesem Fall gibt es

Digitized by Google

keine Kraftcomponente, die auf die Nadel in der Bewegungsebene wirkt, in der sie sich frei bewegen kann, die Nadel ist demnach astatisch.

4. Astatische Abgleichung. Ein gebogener Magnet (Fig. 214) kann astatisch gemacht werden, wenn seine Pole gleiche Momente in Bezug auf die Achse der Aufhängung haben. Diese Form ist sehr empfindlich und lässt sich leicht herstellen.

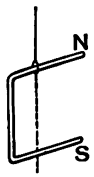


Fig. 214.

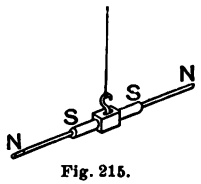


Fig. 215.

5. Lebaillif's Paar. Ein Paar gleich langer, gleich schwer und gleich stark magnetisirter Nadeln lassen sich zu einem astatischen Paar herstellen, wenn man sie anordnet, wie dies in der Figur 215 dargestellt ist. Stellt man die Pole so ein, dass sie grösseren oder geringeren Hebelarm erhalten, so kann man einen äusserst empfindlichen Apparat erlangen. Mit einem solchen, Sideroscop genannten Apparat entdeckte Lebaillif die sogenannte diamagnetische Abstossung des Antimons.

6. Nobili's Paar. Die gewöhnlichste Art zur Anordnung eines astatischen Paares geht aus der Figur 216 hervor, wo zwei Nadeln in umgekehrter Lage zusammengestellt sind. Jedoch tritt absolute Astasie nicht ein: a) wenn nicht die Nadeln genau die gleichen magnetischen Momente besitzen, b) wenn sie nicht vollständig parallel sind. Keine von beiden Bedingungen ist gewöhnlich erfüllt. Um die parallele Lage sicher zu stellen, thut man besser, die untere Nadel an die Enden der oberen mittels zweier kleinen Schlingen aus Aluminiumfolie oder Draht aufzuhängen, anstatt ihnen, wie in der Regel geschieht, in der Mitte eine starre Verbindung zu geben.

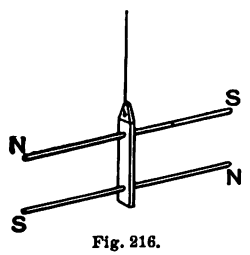


Fig. 216.

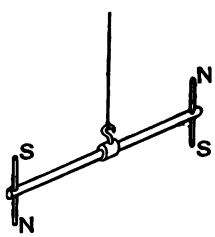


Fig. 217.

7. Senkrechtes Paar. Eine andere Art, ein Paar Nadeln astatisch anzuordnen, hat der Verfasser im Jahre 1886 angegeben; sie ist in Figur 217 angegeben. Wie in Figur 214 hat sie vor den Verbindungen von Nobili und Lebaillif den Vorzug, dass der Grad der Vollkommenheit der Astasie nicht durch ungleichen Abfall des Magnetismus der beiden Nadeln beeinflusst wird. Es gibt noch verschiedene andere mögliche astatische Verbindungen, aber keine wird bei Instrumenten verwendet.

Digitized by Google

Anhang.

I.

William Sturgeon.

William Sturgeon wurde im Jahre 1783 zu Wittingham in Lancashire, ungefähr zwei Meilen von Kirkby Lonsdale, geboren. Sein Vater war ein träger Schuhmacher, der seine Familie vernachlässigte, indem er Fische angelte und Kampfhähne aufzog. Der junge Sturgeon sollte auch Schuhmacher werden, er kam als Lehrling zu einem Meister, der ihn hungern liess und schlecht behandelte. Um aus der traurigen Lage zu entkommen, liess er sich im Jahre 1802, 19 Jahre alt, in Westmoreland anwerben. Zwei Jahre später kam er als gewöhnlicher Soldat in das 2. Bataillon der Royal Artillery und fand noch Musse, sich seiner Leidenschaft für Lesen, Anstellung von chemischen und physikalischen Versuchen hinzugeben. Während seines Dienstes bei der Artillerie wurde (wie er selbst dem verstorbenen Dr. Leigh[1]) mittheilte), seine Aufmerksamkeit auf Gegenstände der Elektricität gelenkt, und zwar durch den Eintritt eines heftigen Gewitters, das sich während seines Aufenthaltes in Newfoundland entlud. Er beschloss, Naturwissenschaften zu studiren, da er aber einsah, dass er unfähig sei, Bücher über diese Gegenstände zu verstehen, so setzte er sich unter allen den schwierigen Umständen, die das Leben eines Soldaten mit sich bringt, das Ziel, Kenntnisse im Lesen, Schreiben und der Grammatik zu erwerben. Ein Artilleriesergeant lieh ihm Bücher, die er, wenn er Nachts vom Posten kam, aus seinem Tornister zum Studiren hervorzuholen pflegte. Er widmete, wie wir seiner Lebensbeschreibung von Dr. J. P. Joule[2])

1) Siehe den Nachruf in der Manchester Examinerand Times v. 14. Dec. 1850.

2) Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, Bd. XIV. S. 53. 1857.

Digitized by Google

entnehmen, beträchtliche Zeit der Mathematik, den todten und den lebenden Sprachen, der Optik und verschiedenen Zweigen der Naturlehre. Er erwarb sich tüchtige Kenntnisse in verschiedenen mechanischen Fächern, war z. B. gewandt im Reinigen von Uhren. Diese während seiner Lehrzeit erlangten Fertigkeiten vermehrte er mit Kenntnissen in der Lithographie, während er ausserdem noch seinen Schuhmacherberuf ausübte. Im Jahre 1820 trat er aus der Artillerie aus und widmete sich einige Zeit hindurch seinem alten Berufe in Lancashire, kehrte aber kurze Zeit darauf nach Woolwich zurück. Während seiner Mussestunden wandte er seine Aufmerksamkeit dem Bau wissenschaftlicher Apparate zu, verschaffte sich eine alte Drehbank und lernte drechseln. Seine ersten Bemühungen beim Bau wissenschaftlicher Apparate waren der Electricität gewidmet; er zeigte eine grosse Leidenschaft für chemische und elektrische Versuche. Sturgeon war ein vertrauter Genosse des Chemikers James March und trat auch in Beziehungen zu Barlow, Christie und Gregory, die sich für seine Bemühungen interessirten. Durch ihren Einfluss wurde er zum Lehrer für Experimentalphilosophie bei der Hon. East. India Company's Military Academy zu Addiscombe ernannt; diese Stelle behielt er bis zu seinem Abgange nach Manchester im Jahre 1838. Seine erste wissenschaftliche Arbeit war die Herstellung einer abgeänderten Form der sich drehenden Cylinder von Ampère (Philosophical Magazine für 1823). Im nächsten Jahre folgten vier Abhandlungen über Thermoelektricität. Im Jahre 1825 überreichte er der Society of Arts die verbesserten Apparate für elektromagnetische Versuche, einschliesslich seines ersten Elektromagnetes aus weichem Eisen (siehe S. 3). Er war damals 42 Jahre alt. Es ist ein interessantes Zusammentreffen, dass in dem Bande der Transactions of the Society of Arts vom Jahre 1825, die Figurentafel, auf der Sturgeon's Elektromagnet abgebildet ist, von dem Elektriker Cornelius Varley, dem Vater des berühmten Cromwell F. Varley, gestochen wurde. Nach Angabe von Joule scheint Sturgeon den Elektromagnet aus weichem Eisen erfunden und ihn sowohl als geraden als auch als hufeisenförmigen Magnet schon im Jahre 1823 hergestellt zu haben, obwohl er die Beschreibung erst 1825 veröffentlichte. Im Jahre 1826 beschäftigte er sich mit den beim Abfeuern von Pulver durch elektrische Entladungen auftauchenden Schwierigkeiten und mit den Mitteln zur Bewältigung derselben. 1830 veröffentlichte er eine Flugschrift unter dem

Digitized by Google

Titel: „Experimental Researches in Elektromagnetism, Galvanism etc". die hauptsächlich von galvanischen Batterien und Elementen handelte. In diesem Werke beschreibt er zum ersten Male das Verfahren zur Amalgamirung der Zinkplatten. Ein oder zwei Jahre später begann er Versuche über die Naturerscheinung des von Arago entdeckten Drehungsmagnetismus und kam zu dem Schlusse, dass die Wirkung wahrscheinlich von einer Störung der elektrischen Fluida durch magnetische Thätigkeit herrührte, „einer Art Rückwirkung gegen die, welche beim Elektromagnetismus stattfindet", als die Veröffentlichung von Faraday's glänzender Untersuchung über magnetoelektrische Induction im Jahre 1831 die vollständige Erklärung gab. Im Jahre 1832 baute er eine umlaufende elektrische Maschine, die erste Erfindung nach Joules Angabe, mit deren Hülfe eine beträchtliche mechanische Kraft durch elektrischen Strom entwickelt wurde. Im Jahre 1823 hatte er die „drehbare Scheibe", eine Abänderung des Pendels von Marsh und des Sternrades von Barlow ausgeführt. Im Jahre 1836 theilte er der Royal Society eine Abhandlung mit, die unter anderm eine magnetoelektrische Maschine mit Anker, Längswickelung und einem Stromwender enthielt, ferner eine andere Form einer magnetoelektrischen Stromquelle, bei der der drehbare Anker mit einem Eisenkern ausgerüstet war. Bei der Beschreibung seines Stromwenders sprach Sturgeon die Meinung aus, dass die so verbesserte magnetoelektrische Maschine schliesslich den Gebrauch der galvanischen Batterie überflüssig machen würde.

Aus irgendwelchem Grunde wurde diese Denkschrift nicht in den Philosophical Transactions aufgenommen, sondern an ihn nach dem Vortrage durch die Royal Society zurückgeschickt. Später liess er sie vollständig ohne Abänderung in seinem Werke „Scientific Researches", das im Jahre 1850 veröffentlicht wurde, abdrucken. Im Jahre 1837 stellte er seine elektromagnetische Spulenmaschine zur Abgabe elektrischer Schläge her, wobei er ein Bündel dünner Eisendrähte als Kern der Spule aus feinem Drahte benutzte. In demselben Jahre untersuchte er die Ursache des häufigen Bruches von Leydener Flaschen durch elektrische Entladungen und entdeckte eine wirksame Art, diesen besonderen Zufall dadurch zu verhüten, dass er den Stab, der die Kugel trägt, mit dem oberen Rande des inneren Belages durch Kreuzbänder aus Metall verband. Diese Erfindung erwies sich so

Digitized by Google

wirksam, dass er während zwölf Jahre, in denen er mit starken Ladungen und Entladungen arbeitete, keine einzige Flasche seiner Batterie zerbrach. Im Jahre 1838 entdeckte er die ungleiche Wärmewirkung an den Polen des Voltabogens. Bei einer Forschung über die magnetischen Eigenschaften von Legirungen, die er der Literary and Philosophical Society in Manchester mittheilte, zeigte er, dass, obwohl Nickel und Eisen beide für sich magnetisch sind, ihre Verbindungen mit anderen Metallen häufig diese Eigenschaft nicht aufweisen. Eine Legirung von Eisen und Zink stellte sich als nicht magnetisch heraus.

Der Luftelektricität widmete er einen grossen Theil seiner Aufmerksamkeit vom Beginn seiner wissenschaftlichen Laufbahn bis kurze Zeit vor seinem Tode. Nicht befriedigt von den gewöhnlichen im Gebrauche bei elektrischen Observatorien befindlichen Apparaten, sandte er Prüfungsdrachen in die Luft, und zu allen Zeiten, bei jedem Wetter, selbst bei beträchtlicher Lebensgefahr verfolgte er diesen wichtigen Zweig der Witterungskunde. Die Ergebnisse von mehr als fünfhundert solchen Beobachtungen — bei einer wurde er beinahe getödtet — lieferten die wichtige Thatsache, dass die Atmosphäre bei heiterem Himmel gleichmässig positiv in Bezug auf die Erde ist, und höhere Luftschichten stärker positiv werden. Mit Sir Wm. Snow Harris hatte Sturgeon einen Streit über Blitzableiter für Schiffe. Er behauptete, dass diese nicht am Mast bis in den Schiffsraum geführt werden dürften, sondern ausserhalb über die Seite laufen müssten, sodass das Schiff mehr oder weniger in ein Netzwerk von Leitern eingeschlossen würde. Im Verlaufe der Discussion hielt Sturgeon die Meinung aufrecht, dass die sogenannten Seitenwirkungen des Blitzes auf benachbarte Gegenstände nicht, wie Harris behauptete, von unvollkommener Neutralisation bei der Entladung, sondern von Inductionsströmen herrührten, eine Ansicht, die heute noch voll anerkannt wird.

Im Jahre 1838 siedelte Sturgeon von Woolwich nach Manchester über, wohin er als Superintendent der Royal Victoria Gallery of Practical Science berufen worden war, eines Institutes, das gleich seinen vom Schicksal nicht begünstigten Vorgängern in London, der Adelaide Gallery und der Royal Polytechnic Institution, dazu ausersehen war, eine Stelle für die Verbreitung populären Wissens zu werden. Unglücklicherweise war dieses Institut für seine Zeit zu gross angelegt, als dass es finanziell mit Erfolg

Digitized by Google

hätte betrieben werden können; es ging nach ungefähr fünf Jahren ein. Sturgeon gab sich viel Mühe, ein anderes Institut ähnlicher Art zu gründen, erhielt aber wenig Unterstützung. Von da ab war sein Lebensunterhalt abhängig von dem bescheidenen Einkommen als wissenschaftlicher Wanderlehrer. In dieser Beschäftigung erlangte er in der That einen grossen Ruf, weil seine Vorträge klar und genau waren und seine Versuche beständig Erfolg hatten. Sein Einkommen war jedoch sehr beschränkt, da er kein Gehalt bezog.

Während jener Jahre war seine literarische Thätigkeit am grössten. Im Jahre 1836 hatte er eine neue periodische Monatsschrift, die Annals of Electricity, das erste Blatt, das wirklich elektrischen Dingen gewidmet war, gegründet. Sturgeon leitete dieses Unternehmen mit grossem Fleisse und hoher Geschicklichkeit durch zehn Octavbände; ein grosser Theil Artikel stammt aus seiner Feder. Für dieses Blatt lieferte Joule verschiedene Abhandlungen; wenn auch der Mangel an Unterstützung das Werk im Jahre 1843 zum Eingehen brachte, so bleibt es doch ein schätzenswerthes Nachschlagewerk. Unter andern Werken gab Sturgeon folgende heraus: „A Course of Twelve Elementary Lectures on Galvanism", „Lectures on Electricity, delivered in the Royal Victoria Gallery in 1841—42", „A Familiar Explanation of the Theory and Practice of Electro-gilding and Electro-silvering". Er veröffentlichte in Facsimile den Abdruck eines berühmten und seltenen Werkes Barlow's „Magnetical Advertisements". Nur wenige Wochen vor seinem Tode vollendete er in einem grossen Quartbande eine Ausgabe seiner eigenen Beiträge zur Wissenschaft unter dem Titel „Scientific Researches". Dieser Band wurde im Wege der Subscription veröffentlicht und war mit einer Anzahl gut ausgeführter Figurentafeln ausgestattet.

Bald nach seinem Eintritt in die Artillerie hatte Sturgeon eine Wittwe Namens Hutton geheirathet, die ein Schuhgeschäft in Woolwich besass. Drei der Ehe entsprossene Kinder starben in der Kindheit. Im Jahre 1829 verheirathete er sich wieder mit Mary Bromley aus Shrewsbury, die ihn überlebte. Ihre einzige Tochter starb auch als Kind. Sie adoptirten Ellen Coates, eine Nichte Sturgeons, die im Jahre 1884 starb.

In den Jahren von 1845 bis 1850 fühlte Sturgeon, der über 60 Jahre alt war, schwer den Druck der Armuth. Nach vielen Bemühungen glang es Dr. Lee, dem Bischof von Manchester

Digitized by Google

und Dr. Binney F. R. S., dem Präsidenten der Literary and Philosophical Society in Manchester, für ihn von Lord John Russels Regierung einen Betrag von 200 £ und ein Jahrgehalt von 50 £ zu erlangen; er erfreute sich jedoch der Pension nur ungefähr 18 Monate. Er starb am Sonntag, den 4. December 1850 zu Prestwich bei Manchester und wurde auf dem Kirchhofe der Prestwich Church begraben. Über seinem Grabe steht ein Stein mit folgender Inschrift:

William Sturgeon,
The Electrician.
Born 1783, died 1850. aged 67.

Also

Mary Sturgeon,
Died October 2nd 1867, aged 77.

Ellen,
wife of Luke Brierly,
Died January 19, 1884, aged 51.

In der Kirche zu Kirkby Londsdale, von wo die Geburtsstätte Sturgeons nur ungefähr 2 engl. Meilen entfernt ist, befindet sich eine Marmortafel mit folgender Inschrift:

„Zum Andenken an William Sturgeon, der zu Wittington A. D. 1783 geboren und zu Prestwich Lancashire am 8. Tage des December 1850 beerdigt wurde. Er war der Sohn armer Eltern und diente beinahe zwanzig Jahre bei der Royal Artillery. Nach Vollendung dieses Dienstes widmete er sich mit Erfolg dem Studium der physikalischen Wissenschaft mit der Kraft der Selbstständigkeit und selten übertroffenem Fleisse. Ausser zahlreichen Werken, die er zur wissenschaftlichen Literatur des Landes beitrug, war er der Erfinder des Elektromagnetes aus weichem Eisen, der amalgamirten Zinkbatterie, der elektromagnetischen Maschine und der wechselwirkenden magnetelektrischen Maschine — Erfindungen von höchstem Werthe, die er mit vielen andern der Welt frei gab. Sein Andenken wird so lange dauern, wie die von ihm gepflegte Wissenschaft bestehen bleibt."

Digitized by Google

Über seine persönliche Erscheinung und seine Eigenschaften berichtet Joule folgendermassen: Sturgeon war von grosser und schöner Körpergestalt, seine Stirn war hoch, seine Züge waren stark markirt. Seine Anrede war lebhaft, und seine Unterhaltung, wie sie gewöhnlich zu sein pflegt, wenn der Geist voller Kenntnisse ist.

In seiner Freundschaft war er warm und fest, im häuslichen Leben liebenswürdig und musterhaft. Er hatte ein edles Gemüth und Herz. Er war ein scharfer und kluger Beurtheiler, rücksichtslos im Aufdecken von Irrthümern. Er verabscheute Grosssprecherei und falsche Anmassung, suchte fleissig nach der Wahrheit und liebte sie um ihrer selbst willen".

Ein Bild Sturgeons, in Öl gemalt, das früher im Besitze seiner Adoptivtochter, der Frau Brierley war, soll noch vorhanden sein. Nach den Angaben derer, die es gesehen haben, ist es das einzig bekannte Bild des berühmten Mannes und bringt die von Dr. Joule gegebene Beschreibung ganz zum Ausdruck.

Eine Zusammenstellung der wissenschaftlichen Ansprüche Sturgeons, in Form eines an Dr. Angus Smith von Dr. Joule gerichteten Briefes, wurde von Smith in seinem Werke „A Centenary of Science in Manchester" aufgenommen. Passend schliesst damit der Abriss über Sturgeons Leben und Werke:

Mein theurer Herr,

Ich habe die Ansprüche des Herrn Sturgeon bis zum äussersten gesichtet, alle periodischen Schriften durchforscht, um gleichsam Licht in die Geschichte des Magnetismus zu bringen. Sturgeon war ohne Zweifel der erste Erfinder des Elektromagnetes, ebenso auch der Urheber der verbesserten elektromagnetischen Maschine. Der von Sturgeon in den „Transactions of the Society of Arts for 1825" beschriebene Elektromagnet ist der erste Apparat, dem man mit Recht diesen Namen geben kann. Arago und Ampère, ebenso wie Davy hatten freilich schon Stahlnadeln dadurch magnetisirt, dass sie elektrische Ströme durch umgebende Spiralen fliessen liessen, aber es scheint nicht, dass sie die Erscheinungen bei Eisennadeln beobachtet haben, noch dass sie irgendwelche Kenntniss von der Geschwindigkeit gehabt hätten, mit der die Polarität des weichen Schmiedeeisens durch einen Wechsel in der Richtung des Stromes geändert werden kann. Deshalb ist es klar, dass Sturgeon das Verdienst zugeschrieben werden muss, den

Digitized by Google

ersten aus weichem Eisen gebauten Elektromagnet hergestellt und auch seine besonderen und bemerkenswerthen Eigenschaften festgestellt zu haben. Dies ist der Grund, aus dem Jacobi in Petersburg für Sturgeon in Verbindung mit Professor Oersted den Anspruch erhob, der Erfinder der elektromagnetischen Maschine zu sein. Sturgeons Ansprüche auf die magnetelektrische Maschine scheinen mir gleich gut begründet zu sein. Er war der Erste, der einen Apparat erfand und ausführte, um Wechselströme in gleichgerichtete umzuwandeln, wodurch er diese Maschine in ähnlicher Weise vervollständigte, wie Watt die Dampfmaschine. Ausserdem ist Sturgeon ohne Widerspruch der Urheber der Systeme fester Messingscheiben und Isolatoren, die auf dem Festland unter dem Namen Stromwender (commutator) in Amerika unter dem Namen „unitress" bekannt sind, Apparate, die jetzt bei jeder magnetelektrischen Maschine verwendet werden. Ohne Zweifel war Sturgeon der Erbauer der ersten umlaufenden elektromagnetischen Maschine.

Der Gebrauch amalgamirter Zinkplatten in galvanischen Batterien rührt von Sturgeon her. Es ist eine Verbesserung von so hohem Werthe, dass sie in der ganzen Welt eingeführt worden ist; alle anderen Anordnungen aus gleicher Zeit sind überholt.

Die Entdeckungen von Sturgeon auf dem Gebiete der Thermoelektricität und des Magnetismus homogener Körper sind sehr wichtig und haben seinen Namen höher gestellt, als den manches anderen Forschers, der nach Seebeck Thermoelektricität behandelt hat.

Vorstehendes ist nur eine unvollständige Übersicht der Entdeckungen und Verbesserungen Sturgeons auf dem Gebiete des Magnetismus, der Elektricität und verwandter Wissenschaften. Obwohl er selbst nicht Urheber von Verallgemeinerungen ausgedehnter Art war, ist er doch hervorragend thätig gewesen, ihnen den Weg zu bahnen und sie praktisch auszuführen. Ich kenne Niemand, der unter gleichen oder selbst geringeren Misserfolgen so Hervorragendes zum Fortschritt dieser interessanten und nützlichen Wissenschaft beigetragen hat.

(gez.) James P. Joule.

II.

Elektrische und magnetische Einheiten.

Die nach internationalem Übereinkommen festgesetzten Grundeinheiten sind:

Digitized by Google

das Ampère oder die Stromeinheit,
das Volt oder die Einheit der elektromotorischen Kraft,
das Ohm oder die Einheit des Widerstandes.

Diese drei praktischen Einheiten gründen sich auf gewisse abstracte Einheiten, die auf mathematischen Erwägungen und durch Versuche bewiesenen Gesetzen beruhen. Es sind:

das Centimeter als Längeneinheit,
das Gramm als Masseneinheit,
die Sekunde als Zeiteinheit.

Das hiervon abgeleitete System der absoluten Einheiten wird als *CGS* System zur Unterscheidung von anderen Systemen bezeichnet.

Jedes Maassystem gründet sich auf eine durch Versuche bewiesene Thatsache oder auf ein Gesetz. Einen elektrischen Strom können wir nur durch die Wirkung messen, die er hervorbringt. Ein Strom kann:

1. Metalle aus ihren chemischen Lösungen fällen;
2. einen Leiter erwärmen;
3. auf einen parallelen benachbarten Strom anziehend oder abstossend wirken;
4. eine elektrische Ladung hervorrufen, die eine benachbarte Ladung abstösst oder anzieht;
5. in seiner Umgebung ein magnetisches Feld hervorrufen, also eine Kraft auf den Pol eines benachbarten Magnetes ausüben.

Man kann irgend eine dieser Wirkungen als Grundlage für ein Maassystem wählen, jede ist auch schon in Vorschlag gebracht worden.

Die fünfte Wirkung bildet die Grundlage des internationalen Systems. Sie ist die zweckmässigste, denn erstens bringt sie die elektrischen Einheiten mit den magnetischen in Verbindung und zweitens steht sie in naher Verbindung mit den mechanischen Einheiten, sodass die mechanischen Werthe der elektrischen Grössen leicht zu berechnen sind.

Durch Versuche findet man, dass die vom Strom auf einen Magnetpol ausgeübte Kraft ausser von der Stromstärke von verschiedenen andern Umständen abhängt. Die Kraft ist unter sonst gleichen Umständen proportional:

1. gerade der Länge des Leiters;
2. umgekehrt dem Quadrat der Entfernung zwischen einem Elemente des Leiters und dem Pole;
3. gerade der Polstärke;

Digitized by Google

Wir müssen folglich:

1. einen Draht von der Einheit der Länge wählen;
2. denselben zu einem Bogen mit dem Radius 1 biegen, sodass jedes Element des Drahtes sich im Abstande 1 vom Pole befindet;
3. dem Pole die Stärke 1 geben.

Senden wir nun durch den Leiter einen Strom von solcher Stärke, dass er auf den Pol mit der Einheit der Kraft wirkt, so kann dieser Strom als Vergleichsmaass dienen, denn ein doppelt so starker Strom wird mit zwei Krafteinheiten auf den Pol wirken u.s.w.

Es bleiben noch die Begriffe „Krafteinheit" und „Einheit der Polstärke" festzustellen.

Eine Kraft wird gemessen durch ihre Leistung; sie kann z. B.

1. eine gegebene Masse unter Überwindung der Anziehung der Erde heben;
2. eine Feder verlängern;
3. einer Masse Beschleunigung ertheilen.

Die erste dieser Leistungen, die zur Wahl am natürlichsten scheint, wird auszuschliessen sein, weil die Anziehungskraft der Erde an verschiedenen Stellen verschieden wirkt; die zweite Leistung würde zunächst die Feststellung der elastischen Eigenschaften von Federn bedingen. Deshalb wird die dritte Leistung gewählt; bezüglich dieser möge man sich erinnern, dass die Geschwindigkeit, die eine Kraft einer Masse ertheilt, proportional ist:

1. gerade der Grösse der Kraft;
2. gerade der Zeit, während deren die Kraft wirkt;
3. umgekehrt der Masse, die von der Kraft beeinflusst wird.

Wenn eine Kraft eine Secunde auf eine Grammmasse wirkt und dieser Masse eine Geschwindigkeit von einem Centimeter in der Secunde ertheilt, so wäre die Kraft eine Krafteinheit — Dyn genannt. Die Anziehungskraft der Erde (Schwerkraft) ist von solcher Grösse, dass sie einer Grammmasse in der ersten Secunde eine Endgeschwindigkeit von 981 Centimeter ertheilt (in der Breite von London), woraus folgt, dass dort die Schwerkraft auf ein Gramm (Grammgewicht) mit 981 Dynen wirkt. Ein Dyn hat demnach ungefähr den Werth von 0,001 019 Gramm.

Ein Magnetpol kann:

1. ein Stück Eisen heben;
2. einen anderen entfernten Magnetpol anziehen oder abstossen.

Die erste dieser Leistungen eignet sich nicht als Grundlage für die Maasseinheit, weil das von einem Magnetpol gehobene

Digitized by Google

Gewicht nicht nur von dem Betrage des Magnetismus des Poles abhängig ist, sondern auch von der Form und den Eigenschaften des gehobenen Eisenstückes. In betreff der zweiten Leistung ist festzuhalten, dass die gegenseitige Abstossung zweier Magnetpole nach den angestellten Versuchen sich verhält:

1. gerade wie das Product der beiden Polstärken;
2. umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung der Pole.

Nimmt man zwei gleiche Pole von solcher Stärke, dass in dem Abstande 1 jeder den anderen mit der Krafteinheit abstösst, so besitzt jeder Pol die Einheit des Magnetismus.

Hiernach können wir nun die Einheiten des *CGS* Systemes folgerichtig entwickeln:

1. Die absolute Krafteinheit (Dyn) ist diejenige Kraft, die, wenn sie eine Secunde auf ein Gramm wirkt, demselben eine Geschwindigkeit von 1 *cm* in der Sekunde ertheilt.
2. Die Einheit des Magnetismus oder Einheit der Polstärke besitzt derjenige Pol, der den gleichen und gleichstarken Pol in der Entfernung von 1 *cm* mit der Krafteinheit (Dyn) abstösst.
3. Die absolute Einheit der Stromstärke besitzt derjenige Strom, der in einem bogenförmigen Leiter von 1 *cm* Länge und 1 *cm* Radius mit der Kraft eines Dyn auf einen im Mittelpunkte des Kreises befindlichen Pol von der Polstärke 1 wirkt.

Den Bedingungen unter 3 ist praktisch schwer Genüge zu leisten; ein Kreis von 1 *cm* Radius ist leichter herzustellen, als ein Bogen von 1 *cm* Länge. Wenn der Radius mehr als 1 *cm* beträgt und mehrere Windungen des Leiters vorhanden sind, wie dies in den meisten Tangentenbussolen der Fall ist, so muss eine Formel benutzt werden.

Bezeichnet r den Radius in Centimetern, S die Zahl der Windungen des Drahtes, i die Stromstärke in absoluten Einheiten, f die vom Strome auf die Poleinheit im Mittelpunkte ausgeübte Kraft in Dynen, so ist $f = \frac{2\pi r S i}{r^2} = \frac{2\pi S i}{r}$.

Bei einer Tangentenbussole wird die Kraft nicht direkt gemessen, sondern indirekt bestimmt und zwar durch den Werth (am Beobachtungsorte) der horizontalen Seitenkraft des Erdmagnetismus (H), sowie durch die Tangente des Ablenkungswinkels der im Mittelpunkte des Stromkreises befindlichen Nadel, während die Windungsebene parallel zum magnetischen Meridian liegt. Es ist dann

Digitized by Google

$$f = H \operatorname{tang} \delta,$$

also $$\frac{2\pi Si}{r} = H \operatorname{tang} \delta,$$

woraus $$i = \frac{rH}{2\pi S} \operatorname{tang} \delta.$$

Sobald r, H, S und tang δ bekannt sind, kann i bestimmt werden.

(Der Werth von H kann in London zu 0,18, Glasgow zu 0,17, Boston zu 0,17, Montreal zu 0,147, Niagara zu 0,167, Halifax N. S. zu 0,159, New York, Cleveland und Chicago zu 0,184, Philadelphia zu 0,194, Washington zu 0,20, Berlin zu 0,178, Paris zu 0,188, Rom zu 0,24, San Francisco zu 0,255, New Orleans zu 0,28, Mexico zu 0,31, Bombay zu 0,33 angenommen werden.)

Ein den vorhin genannten Bedingungen entsprechender Strom ist weit stärker als ein Telegraphirstrom und liefert fast dieselbe Quantität wie ein Strom für ein Bogenlicht.

Die practische Stromeinheit ist deshalb auf den zehnten Theil, Ampère genannt, der absoluten Einheit festgesetzt worden. Wenn demnach i in Ampère auszudrücken ist, so wird:

$$i = \frac{10rH}{2\pi S} \operatorname{tang} \delta.$$

Die Formel liefert ein Mittel zur Herstellung einer Tangentenbussole, die unmittelbar als Strommesser benutzt werden kann und zwar in der Weise, dass die Tangenten der Ausschläge die Stromstärken in Ampère angeben. Zu diesem Zwecke muss der Faktor von $tg\,\delta$ in der Formel gleich 1 sein.

$$\frac{10\,r.\,H}{2\pi S} = 1$$

woraus $$r = \frac{2\pi S}{10\,H}$$

Nimmt man nun 5 Windungen ($S = 5$), so ist

$$r = \frac{\pi}{H}$$

Für Berlin, wo $H = 0{,}178$ ist, würde also $r = 17{,}65$ *cm* sein müssen.

Ein Strom von 1 Ampère scheidet in einer Stunde 1,174 *g* Kupfer und 4,024 *g* Silber aus einer Lösung aus.

Das Board of Trade hat 1892 festgesetzt, dass ein unveränderlicher Strom die Stärke 1 Ampère besitzt, wenn er bei dem Durchgang durch eine wässerige Lösung von salpetersaurem Silber unter Einhaltung der für die Abscheidung günstigen Bedingungen

Digitized by Google

0,001118 *g* Silber in einer Secunde niederschlägt. Weiter ist bestimmt, dass ein Wechselstrom die Stärke von 1 Ampère besitzt, wenn die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerth der Quadrate der Stromstärken in jedem Zeitpunkt 1 Ampère beträgt.

Wir können nunmehr die übrigen elektrischen Eigenschaften feststellen. Die elektromotorische Kraft einer Batterie oder einer Dynamomaschine ist nur eine Bezeichnung für die Kraft, mit der Elektricität durch den Stromkreis getrieben wird.

Zuweilen bezeichnet man sie auch als elektrischen Druck. Als Grundlage für die Einheit der elektromotorischen Kraft kann eine der folgenden Thatsachen gewählt werden. Die elektromotorische Kraft ist proportional:

1. dem Strome, den sie in einem Kreise von gegebenem Widerstande hervorbringt;
2. der Menge der Elektrizität, die sie in einem Condensator von gegebener Ladungsfähigkeit ansammelt;
3. der Anzahl von magnetischen Kraftlinien, die in der Secunde von einem in einem magnetischen Felde sich bewegenden Leiter geschnitten werden

Die erstgenannte Thatsache ercheint dienlich, wenn die Einheit des Widerstandes gegeben wäre, es ist aber passender, sie nicht für die Einheit der elektromotorischen Kraft, sondern für die Einheit des Widerstandes zu benutzen; die zweite wird zur Bestimmung der Einheit der Ladungsfähigkeit, die dritte, die besonders geeignet und die wahre Grundlage der Dynamomaschine ist, wird zur Bestimmung der Einheit der elektromotorischen Kraft verwendet.

Die Einheit der elektromotorischen Kraft wird in einem Leiter hervorgerufen, der in der Secunde eine Kraftlinie bei seiner Bewegung schneidet. Dies setzt eine Bestimmung der Einheit der Kraftlinien voraus, die nachstehend folgt: Die Kraftlinien bezeichnen durch ihre Richtung die Richtung der magnetischen Mittelkraft in dem Raume, den sie durchlaufen — ein solcher von magnetischen Kräften und Kraftlinien durchsetzter Raum ist ein magnetisches Feld.

Da der Zug oder Stoss, der auf einen Magnetpol ausgeübt wird, wenn der letztere in ein magnetisches Feld gelangt, sich wie die Feldstärke verhält, so kann man auf jedes Quadratcentimeter sich so viele Kraftlinien vertheilt denken, als auf die Einheit der Polstärke Dynen einwirken.

Es möge z. B. auf die Einheit der Polstärke an irgend einem Punkte das magnetische Feld mit 40 Dynen wirken, so denken

Digitized by Google

wir uns auf ein Quadratcentimeter des Feldquerschnittes 40 Kraftlinien gezogen. Wenn also die horizontale Seitenkraft des Erdmagnetismus in London 0,18 (Dynen auf die Poleinheit) beträgt, so würden 18 Kraftlinien auf 100 *qcm* einer senkrechten, in der Richtung von Ost nach West verlaufenden Ebene entfallen.

Wenn demnach ein in Bewegung befindlicher Leiter in einer Secunde eine Kraftlinie schneidet, so entspricht die erzeugte elektromotorische Kraft einer Einheit im absoluten *CGS* System. Für practische Zwecke wäre diese Einheit viel zu klein, da z. B. eine Daniell-Zelle 110 Millionen, eine Clarke-Zelle über 143,5 Millionen solcher Einheiten hervorbringt. Die practische Einheit der elektromotorischen Kraft ist daher auf das Hundermillionenfache der absoluten Einheit bestimmt worden und heisst Volt.

Ein Volt ist folglich diejenige in einem Leiter erzeugte elektromotorische Kraft, wenn derselbe bei seiner Bewegung 100 Millionen (10^8) Kraftlinien in der Secunde schneidet.

Die Daniell-Zelle entwickelt etwa 1,1 Volt, die Clarke'sche Normalzelle 1,434 Volt.

Zur Messung elektromotorischer Kräfte dient in der Technik ein Spannungsmesser (Voltmeter).

Durch Versuche wurde gefunden, dass der in einem Kreise durch eine gegebene elektromotorische Kraft erzeugte Strom von dem Widerstande des Kreises abhängt; dass der Strom geringer wird, wenn der Widerstand wächst, in Übereinstimmung mit dem bekannten, von Ohm entdeckten Gesetze.

Ohm's Gesetz besagt, dass der Strom direct proportional der elektromotorischen Kraft und umgekehrt proportional dem Widerstande des Stromkreises ist. Bezeichnet E die Zahl der elektromotorischen Krafteinheiten und R die Zahl der Widerstandseinheiten des Kreises, so ist $\frac{E}{R} = i$.

Der Strom wird demnach aus den Einheiten der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes bestimmt. Die Schreibweise

$$E = R \cdot i$$

wird zweckmässig benutzt, wenn die elektromotorische Kraft zu berechnen ist, die einen bestimmten Strom durch einen gegebenen Widerstand zu treiben vermag.

Würde in einem Stromkreise eine elektromotorische Kraft von einer absoluten Einheit des *CGS* Systemes vorhanden sein, und soll ein Strom von einer Einheit erzeugt werden, so wäre nach

Digitized by Google

dem Ohm'schen Gesetze der Widerstand bis zu einem bestimmten Werthe zu reguliren. Dieser Werth muss äusserst klein ausfallen, sonst würde eine so geringe elektromotorische Kraft einen so starken Strom nicht hervorbringen; er entspricht aber der absoluten Einheit des Widerstandes, denn dem Gesetze von Ohm genügt die Gleichung:

$$\frac{\text{1 Einheit der elektromotorischen Kraft}}{\text{1 Einheit des Widerstandes}} = \text{1 Stromeinheit.}$$

Wie vorhin erwähnt, beträgt die practische Einheit der elektromotorischen Kraft, das Volt, 100 Millionen Einheiten des *CGS* Systemes, während die Stromstärke auf 0,1 Einheit desselben Systemes bestimmt ist.

Ohm's Getetz wird demnach auch erfüllt durch die Gleichung:

$$\frac{\text{100 Millionen } \mathit{CGS} \text{ Einheiten der elektromotorischen Kraft}}{\text{1000 Millionen } \mathit{CGS} \text{ Widerstandseinheiten}} = \text{0,1 } \mathit{CGS} \text{ Einheiten des Stromes.}$$

Die practische Widerstandseinheit — das Ohm — ist demnach 1000 Millionen mal grösser als die Widerstandseinheit des absoluten Maasssystemes.

Der internationale Congress hat 1882 das Ohm als den Widerstand einer Quecksilbersäule von 106 *cm* Länge und 1 *qmm* Querschnitt (die Länge beim Gefrierpunkt des Wassers gemessen) bestimmt; Lord Rayleigh's sorgfältige Messung ergab die Länge von 106,3 *cm*.

In der Praxis werden Widerstände durch Vergleichung mit Normalwiderständen gemessen, die häufig in sogen. Widerstandskästen angeordnet sind, als Messapparate werden besonders das Differential-Galvanometer und die Wheatstone'sche Brücke benutzt. — Betreffs näherer Belehrung wird auf Werke über elektrische Messungen verwiesen.

Ausser den vorgenannten Einheiten ist auch die Einheit der „Leistung" erforderlich, um das Maass der in einer Secunde in einem elektrischen Stromkreise geleisteten Arbeit zu bestimmen.

Zur Bestimmung der Stromarbeit in einem Drahte, einer Lampe u. s. w. ist die Messung der Stromstärke in Ampère, sowie der Anzahl Volt der elektromotorischen Kraft, die in dem betreffenden Theile des Kreises wirksam sind, nothwendig. Aus den beiden Grössen ist das Product zu bilden. Ebenso wie man in der Mechanik von Meter-Kilogrammen spricht, die in einer bestimmten

Digitized by Google

Zeit geleistet werden, gebraucht man als Ausdruck für elektrische Leistungen die Zahl der Volt-Ampère. Für die Einheit der elektrischen Leistungen (Volt-Ampère) wird auch die Bezeichnung „Watt" benutzt.

Ein Watt oder Volt-Ampère ist $\frac{1}{736}$ einer Pferdekraft.[1]) Ein Beispiel der Berechnung elektrischer Leistung möge hier folgen.

Es soll die zum Betriebe einer bestimmten Bogenlampe aufgewendete Arbeit festgestellt werden. Der Spannungsmesser zeigt einen elektrischen Druck von 57 Volt zwischen den Klemmen der Lampe und der Strommesser einen Strom von 10,5 Ampère an. Das Product ist gleich 598,5 Watt oder = 0,80 Pferdekraft (HP).

1000 Watt nennt man ein Kilowatt. Die Einheit des Board of Trade bildet die Kilowattstunde.

Die Einheit der Selbstinduction ist eine abgeleitete Einheit neueren Ursprunges. Verändert ein Strom seine Stärke, so bringt er in einer Wickelung magnetische Linien hervor, die an Zahl sich ändern und auf die Windungen inducirend einwirken. Dadurch werden elektromotorische Kräfte erzeugt, die der Änderung des Stromes entgegenwirken. Das Zeichen für den Coefficienten der Selbstinduction ist L, d. h. wenn die Einheit des Stromes plötzlich entsteht oder verschwindet, so würden die von den Windungen des Kreises geschnittenen Linien den Werth L besitzen.

Die practische Einheit beträgt 10^9 *CGS* Einheiten; eine Wickelung besitzt also als Coefficient einen Quadranten (oder Henry) Selbstinduction, wenn die Einheit des Stromes in der Wickelung entsteht und der Durchgang der magnetischen Linien ein solcher ist, dass 10^9 magnetische Linien von einer einzelnen Windung geschnitten werden.

Wird die Änderung des Stromes zu irgend einer Zeit durch $\frac{di}{dt}$ ausgedrückt, so beträgt der Werth der selbstinducirenden elektromotorischen Kraft, die der Änderung entgegenwirkt

$$-L\frac{di}{dt}.$$

1) Unterschied zwischen englischem und deutschem Maasse:
1 Horse-Power (HP) = 550 Fusspfund in der Secunde,
1 Fusspfund = 0,138 Meterkilogr.
1 Pferdekraft (P) = 75 Meterkilogr. in der Secunde,
1 elektr. HP = 746 Watt,
1 elektr. P = 736 Watt. Anmerk. d. Uebers.

Digitized by Google

Bei gegebener Form und Masse der Wickelung ist der Coefficient der Selbstinduction proportional dem Quadrat der Windungszahl. Die Anwesenheit von Eisen verstärkt die Selbstinductionswirkungen, macht jedoch L zu einer veränderlichen Grösse mit Rücksicht auf die Änderungen der Durchlässigkeit des Kernes.

III.

Anhang zu den Kapiteln IV und V.

Berechnung der Erregung, Zerstreuung u. s. w.

Bezeichnungen.

N = der Zahl der gesammten magnetischen Linien, (nach der Definition im *CGS* System entfällt eine Linie auf das *qcm*, wenn das magnetische Feld eine solche Stärke besitzt, dass ein Dyn auf die Einheit des Magnetpoles entfällt), die durch den magnetischen Stromkreis fliessen. Man gebraucht auch den Namen magnetische Strömung.

B = der Zahl der magnetischen Kraftlinien auf das Quadratcentimeter Eisen, auch Induction oder innere Magnetisirung genannt.

H = der magnetischen Kraft oder Stärke des magnetischen Feldes, ausgedrückt durch die Zahl der magnetischen Kraftlinien auf das *qcm*, die in der Luft vorhanden sein würden.

μ = der Durchlässigkeit des Eisens u. s. w. d. h. seine magnetische Leitungsfähigkeit oder die vervielfältigende Kraft für die magnetischen Kraftlinien.

A = Fläche des Querschnitts in *qcm*.

l = Länge in *cm*.

S = Zahl der Spiralen oder Windungen in der magnetisirenden Wickelung.

i = elektrischer Strom, in Ampère.

v = Coefficient der zulässigen Zerstreuung; das Verhältniss der gesammten magnetischen Strömung zu dem nutzbaren Theil der Strömung. (Er ist stets grösser als die Einheit.)

Beziehung zwischen deutschen und englischen Maassen.

1 Zoll (engl.)	=	2,54 *cm*
1 *cm*	=	0,3937 Zoll (engl.)
1 Quadratzoll (engl.)	=	6,45 *qcm*.

Digitized by Google

1 *qcm*	=	0,1550 Quadratzoll
1 Kubikzoll (engl.)	=	16,39 *ccm*
1 *ccm*	=	0,0610 Kubikzoll (engl.).

Berechnung des Werthes *B* aus der Tragkraft

Es bezeichne *P* den Zug und *A* die Fläche, über der der Zug wirkt, dann kann man die folgende Formel benntzten

$$B = 4{,}965 \sqrt{\frac{P\,kg}{A\,qcm}}.$$

Berechnung des erforderlichen Eisenquerschnitts für eine gegebene Tragkraft.

Der Hinweis auf S. 109 zeigt, dass es nicht rathsam ist, Zugkräfte über 10,5 *kg* auf 1 *qcm* bei Magneten zu verwenden, deren Kerne aus weichem Schmiedeeisen bestehen oder über 1,9 *kg* bei Gusseisen. Hieraus ist die Fläche des Querschnitts leicht zu bestimmen.

Berechnung der Durchlässigkeit aus dem Werth *B*.

Hierzu bedarf man einer Zahlentafel (wie Tafel Seite 68 oder graphischer Curven (Fig. 39), aus denen die Ergebnisse von Messungen an wirklichen Eisenproben der zu wählenden Eigenschaften ersichtlich sind. Die Werthe von μ für die beiden Eisenproben (Seite 68), können annähernd wie folgt berechnet werden.

Für ausgeglühtes Schmiedeeisen $\mu = \dfrac{17000 - B}{3{,}5.}$

Für graues Gusseisen $\mu = \dfrac{7000 - B}{3{,}2}$

Diese Formeln können weder für Schmiedeeisen bei einer Tragkraft, die geringer als 1,95 *kg* auf das *qcm* ist, noch für Gusseisen bei geringerer Tragkraft als 0,16 *kg* auf das *qcm* verwendet werden.

Berechnung der gesammten magnetischen Strömung, die ein Kern von gegebenem Querschnitte bequem anfnehmen kann.

Es ist bereits erwähnt worden, dass es nicht rathsam sei, die Magnetisirung von Schmiedeeisen über 15000—16000 Linien auf das *qcm* oder bei Gusseisen über 6500—7000 zu steigen.

Digitized by Google

Dies sind die höchsten Werthe, die beim Entwurfe von Elektromagneten gewählt werden sollten. Die gesammte magnetische Strömung wird durch Vervielfältigung der so bestimmten Zahl mit der Zahl der *qcm* der Querschnittfläche gefunden.

Berechnung der magnetisirenden Kraft, die erforderlich ist, um durch einen bestimmten magnetischen Widerstand eine gegebene Zahl magnetischer Linien hindurch zu treiben.

Man multiplicirt die Zahl, die den magnetischen Widerstand darstellt, mit der Gesammtzahl der durch ihn hindurch zu treibenden magnetischen Kraftlinien. Das Product ergibt den Werth der magnetomotorischen Kraft. Ist der magnetische Widerstand im Centimeter-Maass ausgedrückt, so muss die wie oben berechnete magnetomotorische Kraft durch 1,257 $\left(\text{d. h. durch } \frac{4\pi}{10}\right)$ dividirt werden, um die Zahl der Ampère-Windungen der erforderlichen erregenden Kraft anzugeben.

Berechnung des magnetischen Widerstandes eines Eisenkernes.

Die Abmessungen sind in Centimetern ausgedrückt.

Der magnetische Widerstand steht in geradem Verhältniss zur Länge und im umgekehrten zum Querschnitt und der Durchlässigkeit, es ergibt sich daher folgende Formel:

$$\text{Magnetischer Widerstand} = \frac{l}{A\mu};$$

Der Werth μ kann nicht eher eingesetzt werden, als bis man weiss, wie gross B werden soll. (Vgl. Tafel auf Seite 68).

Berechnung des gesammten magnetischen Widerstandes eines magnetischen Stromkreises.

Man berechnet die magnetischen Widerstände der einzelnen Theile und addirt sie. Es muss jedoch auf Zerstreuung gerücksichtigt werden, und wenn die Strömung sich theilt, wobei ein Theil durch den Anker fliesst, ein anderer durch Zerstreuung verloren geht, so kommt das Gesetz der Nebenschliessung in Anwendung, wonach der vereinigte Widerstand der Stromwege zusammen der reziproke Werth der Summe ihrer reziproken Werthe ist. Im

Digitized by Google

einfachsten Falle besteht der magnetische Kreis aus drei Theilen: 1) Anker, 2) Luft in den beiden Zwischenräumen, 3) Kern des Magnetes. Diese drei Widerstände müssen getrennt berechnet werden, wie die nachstehende Tafel zeigt. Wenn das Eisen im Anker und Kern von gleicher Güte ist und bis zu gleichem Grade der Sättigung magnetisirt wird, sind μ_1 und μ_3 gleich. Für Zwischenräume ist $\mu = 1$.

	In *cm* Maass.
1. Anker	$\frac{l_1}{A_1 \mu_1}$
2. Zwischenräume	$\frac{2\, l_2}{A_2}$
3. Magnetkern	$\frac{l_3}{A_3 \mu_3}$

Berechnung der Ampère-Windungen der magnetisirenden Kraft, die nöthig sind, die gewünschte magnetische Strömung durch die Widerstände des magnetischen Kreises zu treiben.

Sind die Abmessungen im Centimetermaass ausgedrückt, so gilt die Regel:

Ampére-Windungen = der magnetischen Strömung multiplicirt mit dem magnetischen Widerstande des Kreises, dividirt durch $\frac{4}{10}\pi$ (=1, 257).

Ampère-Windungen, um N Kraftlinien durch das Eisen des Ankers zu treiben:

$$N \cdot \frac{l_1}{A_1 \mu_1} : \frac{4\pi}{10}$$

Ampère-Windungen, um N Kraftlinien durch die beiden Zwischenräume zu treiben:

$$N \cdot \frac{2\, l_2}{A_2} : \frac{4\pi}{10}$$

Ampère-Windungen, um $v\,N$ Kraftlinien durch das Eisen des Magnetkerns zu treiben:

$$v\,N \cdot \frac{l_3}{A_3 \mu_3} : \frac{4\pi}{10}$$

Digitized by Google

Die Summe dieser Werthe ergibt die Gesammtzahl der erforderlichen Ampère-Windungen $= \frac{10}{4\pi} N \left(\frac{l_1}{A_1 \mu_1} + \frac{2\, l_2}{A_2} + \frac{v\, l_3}{A_3 \mu_3} \right)$

Es ist zu bemerken, dass v der Coefficient der zulässigen Zerstreuung ist. Dieser muss in der später erläuterten Weise berechnet werden. Inzwischen ist festzuhalten, dass beim Entwurf von Elektromagneten in irgend einem Fall, in dem v annähernd bekannt ist, die Berechnung sich dadurch vereinfachen lässt, dass man die Fläche des Querschnitts vom Eisenkern zu der des Ankers im gleichem Verhältnisse grösser nimmt. Wenn es bekannt wäre, dass z. B. die Zerstreuung der Linien an Zahl jener gleichkommt, die im Anker nutzbar werden ($v = 2$), so muss der Querschnitt des Kernes doppelt so gross als der Querschnitt des Ankers sein. In solchem Falle wird μ_3 annähernd gleich μ_1 sein.

Berechnung des Coefficienten v der zulässigen Zerstreuung.

v ist gleich der gesammten magnetischen im Kern erzeugten Strömung dividirt durch die nutzbare magnetische Strömung im Anker. Die nutzbaren und nicht nutzbaren magnetischen Strömungen stehen im geraden Verhältnisse zur Durchlässigkeit auf den entsprechenden Wegen. Durchlässigkeit oder magnetische Leitungsfähigkeit[1]) ist der reziproke Werth des magnetischen Widerstandes. Nennt man die nutzbare Leitungsfähigkeit im Anker und in den Zwischenräumen u und die nicht nutzbare Leitungsfähigkeit im Zerstreuungsfelde w, so ist $v = \frac{u + w}{u}$.

w kann nach der Tafel auf S. 155 oder anderen Regeln geschätzt, sollte aber durch 2 dividirt werden, weil der Durchschnittswerth der magnetischen Potentialdifferenz auf der Zerstreuungsoberfläche nur ungefähr die Hälfte der Potentialdifferenz an den Enden der Pole beträgt.

Regeln zur Schätzung der magnetischen Zerstreuung (Nach Forbes).

1) Leitungsfähigkeit zwischen zwei parallelen gegenüberstehenden Flächen (Fig 218). Sind die Flächen (in *qcm*) A_1 und A_2

1) Auch magnetische Capacität genannt.

Digitized by Google

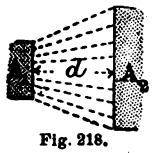


Fig. 218.

und bedeutet d den Abstand, so ist das Leitungsvermögen $\frac{1}{2}(A_1+A_2):d$. Figur 218.

2) Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen rechtwinkeligen in einer Ebene liegenden Flächen. Figur 219.

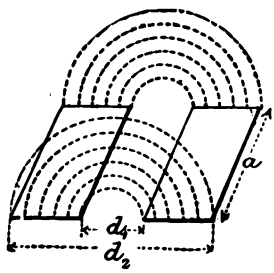


Fig. 219.

Es wird angenommen, dass die Linien Halbkreise bilden. d_1 und d_2 bedeuten die Abstände der zugekehrten bezw. der am weitesten abstehenden Ränder, a die Entfernung, auf der die Flächenkanten parallel laufen. Die Leitungsfähigkeit ist:

$$\frac{a}{\pi}\ log.\ nat.\ \frac{d_2}{d_1}$$

3) Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen rechtwinkeligen in derselben Ebene in einiger Entfernung liegenden Flächen. Figur 220.

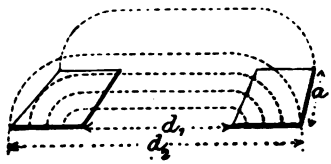


Fig. 220.

Es wird angenommen, dass die Linien in der Luft in Viertelkreisen verlaufen, die durch gerade Linien verbunden sind. Die Leitungsfähigkeit ist

$$\frac{a}{\pi}\ log.\ nat.\left(1+\frac{\pi\,(d_2-d_1)}{2\,d_1}\right)$$

4) Leitungsfähigkeit zwischen zwei gleichen im Winkel zu einander stehenden Flächen. Beträgt der Luftwinkel 90°, so ist die Leitungsfähigkeit doppelt so gross, als nach Formel 2 oder 3 berechnet worden ist. Beträgt der Luftwinkel 270°, so ist $^2/_3$ des Werthes der Formel 2 zu nehmen.

5) Leitungsfähigkeit zwischen zwei parallelen Cylindern von unendlicher Länge. Vgl. die Berechnungen zur Figur 78 auf Seite 153.

IV.

Grundgesetze des Elektromagnetismus.

Zur Ergänzung und Erläuterung einiger im Text vorkommenden Formeln soll die nachfolgende Übersicht über die Grundgesetze

Digitized by Google

des Elektromagnetismus auf Grundlage der magnetischen Einheiten des *CGS* Systems dienen.

I. Gegenseitige Wirkung von zwei magnetischen Punktpolen.

Wirken zwei magnetische Pole in einem Abstand r aufeinander und sind ihre Abmessungen im Vergleich zum Abstand so klein, dass man sie als Punkte betrachten darf, so gilt das allgemeine geometrische Gesetz der Wirkung zweier Punkte aufeinander, das gewöhnlich als das Gesetz der umgekehrten Quadrate bezeichnet wird. Hiernach wirken die Punkte aufeinander mit einer Kraft proportional dem Producte der Polstärken und umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes. Die Kraft wirkt in der Richtung der Verbindungslinie der beiden Punkte und äussert sich entweder als Abstossung oder als Anziehung, je nachdem die beiden Pole gleichnamig oder ungleichnamig sind.

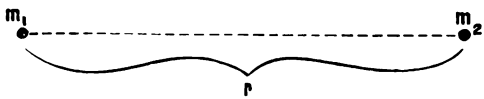


Fig. 221.

Die Mengen des Magnetismus in den beiden Polen seien m_1 und m_2, der Abstand sei r. Sind m_1 und m_2 in *CGS* Einheiten gegeben und ist r in *cm* ausgedrückt, so beträgt die Kraft in Dynen

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

II. Gegenseitige Wirkung eines magnetischen Punktpoles und eines Stromelementes. (Erster Fall). Das Stromelement liege in seiner Längsrichtung senkrecht zu der Ebene, in der sich das Element und der Pol befindet. Sind die Abmessungen im Vergleich zum Abstand so klein, dass sie als Punkte betrachtet werden dürfen, so gilt wiederum das geometrische Gesetz der Punktwirkung; die gegenseitige Wirkung ist dem Product der Stärken gerade und dem Quadrat des Abstandes umgekehrt proportional. Die Kraft wirkt aber nicht in der Richtung der Verbindungslinie und bewirkt weder eine Anziehung noch eine Abstossung, sondern wird unter rechten Winkeln zur Verbindungslinie ausgeübt, ebenso unter rechten Winkeln

Digitized by Google

zur Länge des Stromelementes. Es tritt das Bestreben des gegenseitigen Umlaufes um einander hervor.

Die Menge des Magnetismus des Poles betrage m Einheiten, die Länge des Stromelementes werde durch dl ausgedrückt, die Stromstärke sei i Ampère, der Abstand r *cm*. Dann ist für magnetische Zwecke die Stärke des Stromelementes gleich $\frac{i\,dl}{10}$. Die gegenseitige Kraft in Dynen ergibt sich aus der Formel

$$f = \frac{m \cdot i\,dl}{10\,r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

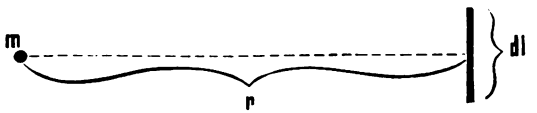


Fig. 222.

III. Gegenseitige Wirkung eines magnetischen Punktpoles und eines schräg liegenden Stromelementes. (Zweiter Fall).

Das Stromelement dl bilde einen Winkel Θ zu der Verbindungslinie seines Mittelpunktes mit dem Magnetpol. Dann ist die wirksame Länge in Bezug auf die magnetische Masse m, oder die Wirkung von m auf das Element gleich $dl \sin \Theta$. Demnach wird die magnetische Stärke gleich $i\,dl \sin \Theta/10$ sein. Setzt man diesen Werth in Gl. (1) ein, so folgt:

$$f = m \cdot i \cdot dl \cdot \sin \Theta / 10\,r^2 \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

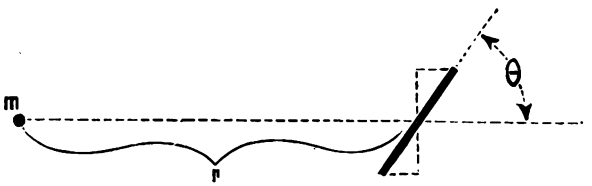


Fig. 223.

IV. Gegenseitige Wirkung zweier Stromelemente. (Erster Fall).

Die magnetischen Punktpole seien durch zwei Stromelemente, die beide zur Verbindungslinie senkrecht stehen und einander parallel sind, ersetzt. (Fig. 221).

Die Stromstärken seien i_1 und i_2, die Längen dl_1 und dl_2, der Abstand r. Ist die Länge im Vergleich zum Abstand klein, so gilt wieder das Gesetz der umgekehrten

Digitized by Google

Quadrate, die Kraft wird in der Richtung der Verbindungslinie der Mittelpunkte ausgeübt. Besitzen die Ströme gleiche Richtung, so findet Anziehung Statt, andernfalls Abstossung.

Die Kraft in Dynen beträgt:

$$f = i_1 \cdot i_2 \cdot dl_1 \cdot dl_2 \cdot \frac{}{100\, r^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

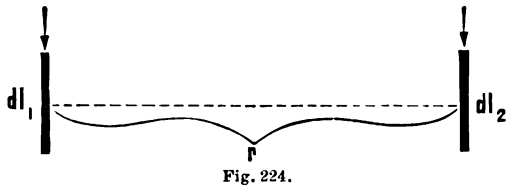


Fig. 224.

V. Gegenseitige Wirkung zweier geneigter Stromelemente. (Zweiter Fall).

Liegen beide Elemente in derselben Ebene und bilden sie mit der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte die Winkel Θ_1 und Θ_2, so ist:

$$f = i_1 \cdot i_2 \cdot dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \Theta_1 \cdot \sin \Theta_2 \; \frac{}{100\, r^2} \quad . \quad . \quad (5)$$

Liegen die Elemente nicht in derselben Ebene und ist φ der Winkel, den sie miteinander bilden, während Θ_1 und Θ_2 die Winkel mit der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte bedeuten, so ist der Werth der gegenseitigen Kraft:

$$f = i_1 \cdot i_2 \cdot dl_1 \cdot dl_2 \left(\cos \varphi - \frac{3}{2} \cos \Theta_1 \cdot \cos \Theta_2 \right) \frac{}{100\, r^2} \quad . \quad (6)$$

Dieser letzte Ausdruck ist die bekannte Formel von Ampère für die gegenseitige Wirkung von Stromelementen.

VI. Magnetisches Feld eines Punktpoles.

Die Erklärung für die Feldstärke, wonach diese durch die auf die Poleinheit ausgeübte Kraft gemessen wird, liefert zugleich einen Ausdruck für die Feldstärke in irgend einem Punkte in einem Abstand r von einem Punktpol, der m magnetische Einheiten besitzt; nach Gl. (1) ist die Feldstärke

$$H = \frac{m}{r^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Hier bedeutet H die Anzahl der Dynen für die Poleinheit.

VII. Magnetische Linien im magnetischen Felde.

Zur Unterstützung der Vorstellung durch eine graphische

Digitized by Google

Darstellung benutzt man die von Faraday stammende Art der Darstellung des magnetischen Feldes durch magnetische Linien. Deren Lage im Raum wird in der Weise vorausgesetzt, dass ihre Richtung in jedem Punkte die Richtung der resultirenden magnetischen Kraft darstellt, die in dem betreffenden Punkte herrschen würde, wenn dort sich die Einheit des Poles befände. Die Dichtigkeit der Linien ergibt die Grösse der magnetischen Kraft.

Nach dieser Vorstellungsweise rechnet man so viele magnetische Linien auf das *qcm* (des orthogonalen Querschnitts), als Dynen für die Einheit der Polstärke entfallen. Wird z. B. an irgend einer Stelle eines kräftigen magnetischen Feldes eine Kraft von 5000 Dynen auf die Poleinheit ausgeübt, so müssen wir uns 5000 Linien auf das *qcm* Fläche gezogen denken. Das Zeichen H, das für die Zahl der Dynen auf die Poleinheit gilt, kann demnach als Zahl der magnetischen Linien für das *qcm* Fläche betrachtet werden.

VIII. Zahl der magnetischen Linien, die strahlenförmig von der Poleinheit ausgehen.

Man denke sich um die magnetische Poleinheit eine Kugelfläche mit dem Radius 1 *cm*. Deren Oberfläche beträgt $4\,\pi\ qcm = 12{,}566\ qcm$. Bringt man eine Poleinheit an irgend eine Stelle der Kugelfläche, so befindet sie sich im Abstand von 1 *cm* von der Poleinheit im Mittelpunkt. Nach der Formel (1) beträgt daher die Kraft f 1 Dyne. Die Stärke des Feldes würde überall auf der Kugelfläche 1 Dyne betragen. Demnach muss man annehmen, dass auf ein jedes Quadratcentimeter Oberfläche 1 Linie zu ziehen ist. Da die Oberfläche $4\,\pi\ qcm$ enthält, so kann man demnach die von einer Poleinheit nach allen Richtungen ausgehenden magnetischen Linien mit $4\,\pi$ berechnen. Besitzt nun der Pol im Mittelpunkt m magnetische Einheiten, so gehen von ihm $4\,\pi\,m = 12{,}566\,m$ magnetische Linien aus. Diese numerische Beziehung gilt, mag der Pol ein Punkt sein oder nicht.

IX. Magnetische Linien, die von einem gleichförmigen flachen Pol ausgehen.

Es sei die flache polare Oberfläche eines langen Stabmagnetes gleichförmig magnetisirt. (Im Allgemeinen lässt

Digitized by Google

sich dies nicht ausführen, weil die Ränder und Ecken viel stärker von den magnetischen Linien durchsetzt werden, abgesehen von dem Falle, in dem die Polfläche durch einen schmalen, parallelen Zwischenraum von einer gegenüberstehenden polaren Fläche entgegengesetzter Art getrennt ist.) Man kann dann annehmen, dass die Oberflächen-Magnetisirung gleichförmig vertheilt sei und eine bestimmte Zahl magnetischer Einheiten auf jedes Quadratcentimeter Oberfläche entfiele. Wenn man mit σ die Oberflächendichte des Magnetismus bezeichnet, so treten von jedem Quadratcentimeter $4\pi\sigma$ Linien aus. Da diese Linien senkrecht zur Oberfläche liegen und auf einige Entfernung hin als nahezu parallel laufend gelten können, so folgt, dass die Feldstärke in jedem Punkt in der Nähe der Oberfläche sich ausdrücken lässt durch die Formel

$$H \text{ (in der Nähe der Polfläche)} = 4\pi\sigma \quad . \quad . \quad (8)$$

X. Magnetisches Feld im Umkreis eines Elements mit der Einheit der Stromstärke.

Unter II wurde ein senkrecht in der Ebene des magnetischen Poles liegendes Stromelement betrachtet. Wir nehmen an, dass die absolute Einheit der Stromstärke (10 Am.) in einem Leiter herrsche, und der betrachtete Leitertheil 1 *cm* lang ist, sodass sowohl die Längeneinheit als auch die Einheit der Stromstärke in Frage kommt. Ersetzt man die magnetische Poleinheit durch dieses bestimmte Stromelement, so ist das Feld in irgend einem Abstande in der aequatorialen Ebene numerisch mit dem Felde eines Einheitspoles in gleichem Abstande identisch. Es folgt daraus, dass bei einer Stromstärke von i Am. das Feld (in der aequatorialen Ebene) für 1 *cm* Länge und in einem Abstande von r *cm* sich berechnet aus der Formel

$$H = \frac{i}{10\,r^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

In irgend einem Punkte, der nicht in der aequatorialen Ebene des Elementes liegt, sondern so, dass die zum Mittelpunkt des Elementes gezogene Verbindungslinie mit der Stromrichtung den Winkel Θ bildet, beträgt die Feldstärke

$$H = \frac{i \cdot \sin\Theta}{10\,r^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Digitized by Google

XI. Die von einem stromführenden Leiter geleistete Arbeit, wenn der Leiter die Linien des Feldes schneidet.

Auf S. 44 ist nachgewiesen worden, dass, wenn ein Leiter, in dem i Am. Strom fliessen, durch eine magnetische Strömung von N Linien bewegt wird, der Betrag der vom System geleisteten Arbeit in *Erg* durch die Formel

$$W = \frac{Ni}{10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

ausgedrückt wird. Das Gleiche gilt für den Fall, dass der Leiter feststeht, während das magnetische Feld sich so bewegt, dass seine Linien den Leiter schneiden.

Es lässt sich auch unmittelbar die Formel für die Kraft ableiten, die durch eine Feldstärke H auf den stromführenden Leiter ausgeübt wird. Bezeichnet man mit f die Anzahl Dynen und wird der Leiter über einen Raum von b *cm* seitwärts durch durch das Feld bewegt, so ist die Arbeit $f \cdot b$; die vom Leiter mit der Länge l beschriebene Fläche ist $b \cdot l$. Da nun $N = b \cdot l \cdot H$ ist, so folgt

$$W = f \cdot b \cdot = \frac{Ni}{10} = \frac{b \cdot l \cdot H \cdot i}{10}$$

oder

$$f = \frac{H \cdot l \cdot i}{10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

XII. Gesammte magnetisirende Kraft (oder Linienintegral der magnetisirenden Kräfte) eines Stromes, der in einem spiralförmigen Leiter fliesst.

Es herrsche in einem Leiter die Stromstärke i Am., der Leiter besitze n Windungen. Es ist bekannt, dass die gesammte magnetisirende Kraft dann der Zahl der Ampère-Windungen proportional ist. Der Versuch zeigt, dass z. B. ein Strom von 10 Am Stärke in einer Spirale von 50 Windungen die gleiche magnetische Wirkung wie ein Strom von 5 Am. Stärke in 100 Windungen oder ein Strom von 1 Am. Stärke in 500 Windungen besitzt. Wir bestimmen zunächst die Arbeit, wenn die Einheit des Magnetpoles irgend einen geschlossenen Weg, von einem Punkt zu diesem wieder zurücklegen und wenn dieser Weg durch die sämmtlichen Spiralwindungen der

Digitized by Google

Wickelung führen würde, wie z. B. die punktirte Linie in der Figur 222 andeutet.

Die Arbeit, die für die Einheit des Poles zu leisten ist, um sie gegen die magnetisirenden Kräfte des Systems herum zu bewegen, bildet ein Maass der Kraft des Systems zu magnetisiren, oder mit andern Worten ein Maass der magnetomotorischen Kraft[1]). Ein so geschlossener Weg kann ja nach Umständen entweder ganz in der Luft und theilweise im Eisen oder ganz im Eisen liegen. Der Beweis ist ganz unabhängig vom Material, das in dem vorausgesetzten Wege liegt. Wir nehmen nun an, dass 4π magnetische Linien von der Poleinheit strahlenförmig austreten und der Pol den geschlossenen Weg innerhalb der Windungen durchläuft. Jede Windung schneidet jede magnetische Linie und deshalb ist die Arbeit

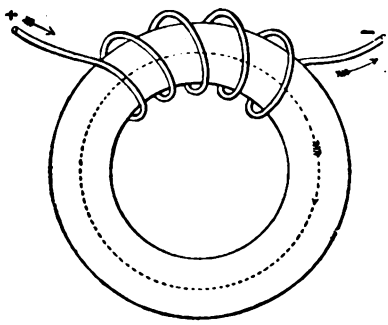


Fig. 225.

$$W = \frac{4\pi ni}{10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Da $\frac{4\pi}{10} = 1{,}257$ ist, so erhalten wir die auf Seite 41 gegebene Regel, dass die gesammte magnetomotorische Kraft gleich 1,257 mal der Anzahl der Ampère-Windungen ist.

XIII. Stärke des magnetischen Feldes in einem unendlich langen Solenoid.

Bedeutet H die in einem magnetischen Felde auf die Poleinheit ausgeübte Kraft, so beträgt die Arbeit, die bei der Bewegung des Poles über eine Weglänge von l *cm* geleistet wird:

---

1) Dieser ideale Vorgang ist einem andern ähnlich, der auf elektrische Kreise Anwendung findet. In solchen bestimmt man theoretisch die gesammte elektromotorische Kraft im Kreise, indem man die Arbeit betrachtet, die geleistet werden müsste, um die Einheit der Elektricität durch den Kreis gegen die elektrischen Kräfte zu treiben.

Digitized by Google

$$W = H \cdot l$$

Besitzt ein Solenoid die Länge l und n Windungen, die gleichförmig von einem zum andern Ende gelegt sind, so kann man die Arbeit, die bei der Bewegung der Poleinheit von einem zum andern Ende des Solenoides gegen die magnetisirenden Kräfte zu leisten ist, entweder durch die vorhin gegebene Formel oder nach der Formel (13) berechnen. Setzt man die beiden Werthe einander gleich, so folgt als Werth für H

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{ni}{l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

d. h. die innere Feldstärke ist gleich 1,257 mal der Zahl der Ampère-Windungen für das Centimeter, wie auf S. 42 angegeben wurde.

Diese Gleichung, die für eine unendlich lange röhrenförmige oder für eine ringförmige Wickelung gilt, stimmt nur näherungsweise für röhrenförmige Wickelungen von endlicher Länge, weil in letzterem Falle die Kräfte an den offenen Enden abfallen. Für Wickelungen, die 10 bis 20 mal so lang als ihr Durchmesser sind, stimmt der Werth bis auf 99 % für den ganzer mittleren Theil der Wickelung. Ungenau wird der Werth an Punkten, die in einem Abstande von 3 Durchmessern vom Ende liegen. Der Werth vermindert sich von da bis zur Öffnung der Wickelung, wo die Feldstärke halb so gross ist, als im Mitteltheil. An den Mündungen der Wickelung ist demnach die Feldstärke

$$H = \frac{2\pi}{10} \cdot \frac{ni}{l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

XIV. Magnetische Spiegelung.

Der Werth der magnetischen Kraft in einem Punkte P, der am oberen Ende einer röhrenförmigen Wickelung AB liegt, ist vorhin angegeben worden. Liegt indessen das Ende der Wickelung gegen einen grossen Block oder eine Platte von sehr weichem Eisen an (dessen Durchlässigkeit 3000 mal grösser als die Durchlässigkeit der Luft ist, so ist die Wirkung im Punkte P so, als ob die Röhrenwickelung über P bis C in gleicher Länge wie AB hinausragt. Das Eisen wirkt dann thatsächlich wie eine Art Spiegel, die magnetisirenden Kräfte werden verdoppelt.

Digitized by Google

Bringt man solche Eisenmassen an beiden Enden einer röhrenförmigen Wickelung an, so wirkt die Röhre auf innene *P*unkte so, als ob sie unendlich lang wäre. Die Formel (14) stimmt sogar für kurze Wickelungen dann genau. Daraus ergibt sich die Berechtigung zur An-

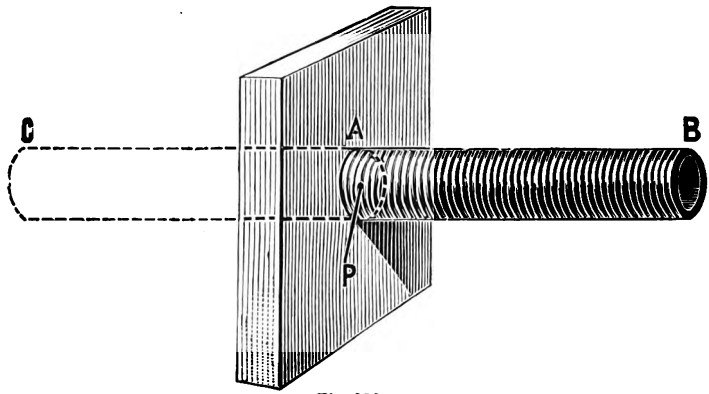


Fig. 226.

wendung der Formel in solchen Fällen, wie sie beim Gebrauche des vom Verfasser angegebenen, auf Seite 72 beschriebenen Durchlässigkeitsmessers vorliegen.

XV. Magnetisches Feld eines unendlich langen geraden Leiters.

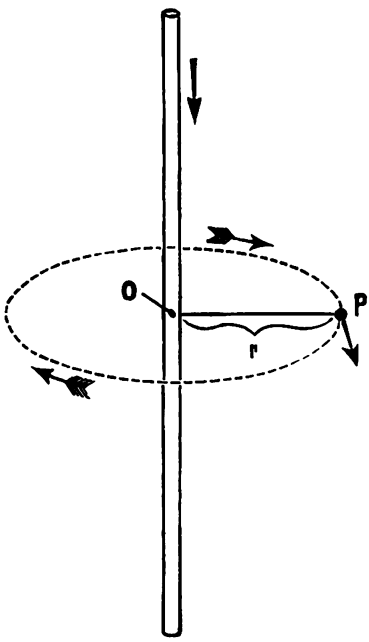


Fig. 227.

Im Punkte *P* befinde sich im Abstande *r* von einem unendlich langen geraden Leiter, in dem die Stromstärke *i* Am. herrscht, eine magnetische Poleinheit. Fliesst der Strom abwärts, so sucht er den Pol um den Leiter nach rechts herum (wie in der Figur gezeichnet) zu bewegen. Die auf den Pol ausgeübte tangentiale Kraft wird wie folgt berechnet. Würde der Pol um den Leiter im Abstand *r* umlaufen, so würde jede der 4π magnetischen, vom Pol ausgehenden Linien einmal vom Leiter geschnitten. Nach der For-

Digitized by Google

mel (11) wäre die Arbeit bei einer Umdrehung des Poles gleich $\frac{4\pi i}{10}$. Diese Arbeit wird aber geleistet, während die Einheit den Weg $2\pi r$ im Umlauf zurücklegt, sodass auch

$$W = 2\pi r f = \frac{4\pi i}{10}$$

Da nun die Kraft f auf die Poleinheit der Feldstärke entspricht, so folgt, dass

$$H = f = \frac{2i}{10r} = \frac{i}{5r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Die auf die Poleinheit in einem Abstand von 4 *cm* von einem langen, geraden Leiter bei 60 Am. ausgeübte Kraft würde demnach 3 Dynen oder $^3/_{981}$ Gramm betragen.

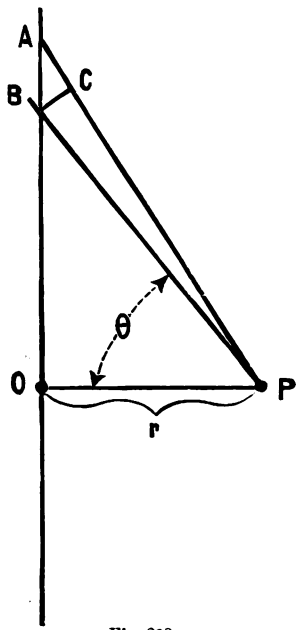


Fig. 228.

Anderer Beweis. Es sei dl ein Element AB eines langen geraden Leiters. Der Abstand AP sei gleich a. Nach der Formel (3) ist dann die Kraft df, die auf die Poleinheit in P vom Strom i in dem Element ausgeübt wird:

$$df = \frac{i\,dl \sin OBP}{10\,a^2}$$

$$df = \frac{i\,dl \cos \Theta}{10\,a^2}$$

wenn Θ den Winkel OPB bedeutet.

Man ziehe nun senkrecht zu AP die Linie BC. Der Winkel BPC wird durch $d\Theta$ ausgedrückt, die Linie BC stellt die wirksame Länge des Elementes AB dar. Nur ist $BC = a\,d\Theta = dl \cos ABC = dl \cos \Theta = \frac{r\,dl}{a}$

$\frac{1}{a^2}$ ist gleich $\frac{\cos \Theta}{ar}$. Es folgt nach Einsetzung der Werthe $a\,d\Theta$ und $\frac{\cos \Theta}{ar}$:

$$df = \frac{i \cos \Theta\, d\Theta}{10\,r}$$

Digitized by Google

Ist der Leiter unendlich lang, so ist die Integration in den Grenzen $\Theta = 90^0$ und $\Theta = -90^0$ auszuführen, so dass

$$f = \frac{i}{10\,r} \int_{\Theta=-90}^{\Theta=90} \cos\Theta\, d\,\Theta$$

Da $\sin 90 = +1$ und $-\sin(-90) = +1$ ist, so wird

$$f = \frac{2\,i}{10\,r} \quad \ldots\ldots \quad (16^b)$$

Ist der Leiter nicht unendlich lang, sondern werden oberhalb und unterhalb des Punktes P gleiche Winkel Θ von den Verbindungslinien gebildet, so ist

$$f = \frac{2\,i \sin\Theta}{10\,r} \quad \ldots\ldots \quad (17)$$

Die durch einen unendlich langen geraden Leiter auf eine Compassnadel ausgeübte Kraft ist dem Abstande (nicht dem Quadrat desselben) vom Leiter umgekehrt proportional. Diese Thatsache wurde 1820 von Biot und Savart festgestellt. Das magnetische Feld um einen solchen geraden Leiter besteht aus cylindrischen Wirbeln von Kraftlinien, deren Dichtigkeit mit dem Abstand vom Leiter abnimmt.

XVI. Magnetisches Feld eines Leiters, der als Rechteck gestaltet ist.

Es fliesse in dem mit den Seiten a und b (in cm) gestalteten Rechteck ein Strom von der Stärke i Am. Im Mittelpunkt P befinde sich eine Poleinheit.

Die auf den Pol P von einer Seite b ausgeübte Kraft beträgt nach Formel (17) $\frac{4\,i \sin\Theta_1}{10\,a}$ und die von der Seite a ausgeübte Kraft beträgt $\frac{4\,i \sin\Theta_2}{10\,b}$.

Die gesammte Kraft aller vier Seiten ist sonach

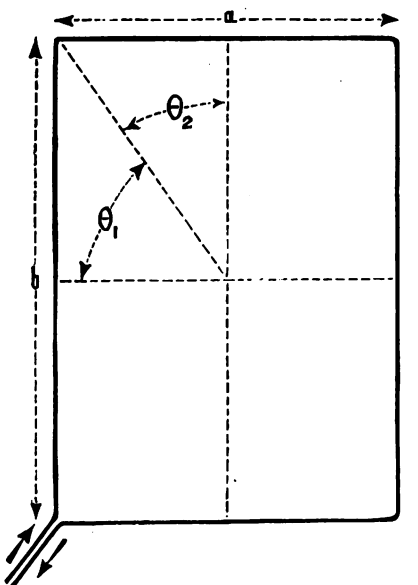


Fig. 229.

Digitized by Google

$$f = 0{,}8\, i \left(\frac{\sin \Theta_1}{a} + \frac{\sin \Theta_2}{b} \right)$$

$$f = 0{,}8\, i \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (18)$$

Bezeichnet man die ganze Länge einer Drahtwindung l mit $2(a + b)$, so folgt

$$f = \frac{0{,}8\, i}{\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{l^2}{4\, ab} - 2} \quad \ldots \ldots \quad (19)$$

Dieser Werth wird ein Minimum, wenn $a = b$ ist; hieraus geht hervor, dass von allen Rechtecken, die man aus einer gegebenen Drahtlänge herstellen kann, das Quadrat die geringste Feldstärke im Mittelpunkt liefert. Das Quadrat ergibt indessen von allen möglichen Rechtecken die grösste magnetische Strömung im Stromkreis, da es die grösste Fläche einschliesst.

Die folgenden Werthe der Feldstärke im Mittelpunkt verschiedener regelmässiger Figuren, von denen jede den Umfang l besitzt, sind von Interesse.

Reglmässiges Vieleck mit n Seiten.

$$f = \frac{0{,}4\, i}{l}\, \pi^2 \left(\frac{\sin \frac{\pi}{n}}{\pi/n} \right)^2 \frac{1}{\cos \pi/n}$$

Ist $n = \infty$ (die Figur also ein Kreis), so ist

$$f = 0{,}4\, \frac{\pi^2 i}{l} = 3{,}95\, \frac{i}{l}$$

Da $l = 2\pi r$ ist, so ist diese Formel gleichbedeutend mit

$$f = \frac{2\, \pi i}{10\, r}$$

Regelmässiges Sechseck.

$$f = 4{,}1\, \frac{i}{l}$$

Quadrat.

$$f = 4{,}5\, \frac{i}{l}$$

Gleichseitiges Dreieck.

$$f = 5{,}4\, \frac{i}{l}$$

Für ein Rechteck, dessen eine Seite die zehnfache Länge der andern besitzt, beträgt der Werth von f im Mittelpunkte

Digitized by Google

$$f = 17{,}6\frac{i}{l}$$

Dies erklärt die Verwendung des verlängerten Gestelles für die Spule des Galvanometers von Nobili.

XVII. Magnetisches Feld eines kreisförmigen Stromleiters.

Die von einem Strome, der in einem kreisförmigen Stromleiter fliesst, auf die Poleinheit in einem Punkte P in der Axe des Stromleiters ausgeübte Kraft lässt sich ermitteln, indem man den Ausdruck für die Wirkung eines Elementes auf einen Pol betrachtet.

Betrachtet man nach der Figur 230 die Wirkung eines Elementes in einem Abstand a von P, der durch $a = \sqrt{x^2 + y^2}$ bemessen wird, so sieht man, dass die Wirkung in einer Richtung unter rechtem Winkel zu a erfolgen muss, da das Stromelement selbst rechtwinkelig zur Linie a liegt. Die Kraft auf P in dieser Richtung beträgt:

$$df = \frac{i\,dl}{10\,a^2}$$

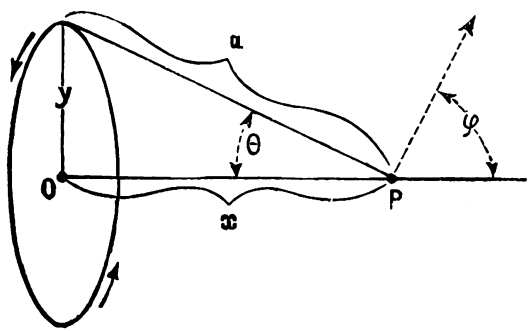


Fig. 230.

Da die Elemente dl symmetrisch zur Axe liegen, so sind die Kräfte in zwei Theile zu zerlegen; der eine Theil wirkt senkrecht zur Axe x, wird indessen von entgegengesetzt gerichtetem Theil aufgehoben; der andere Theil wirkt in der Richtung der Axe. Der letztere Theil berechnet sich für jedes Element aus der vorstehenden Formel, die aber dann noch mit cos φ oder sin Θ zu multipliciren ist. Die Wirkung in der Axenrichtung beträgt für jedes Element

$$df = \frac{idl \sin \Theta}{10\,a^2}$$

Digitized by Google

und, da $\sin \Theta = \frac{y}{a}$ ist

$$df = \frac{i y \, dl}{10 a^3}$$

Die gesammte Wirkung aller Elemente wird durch

$$\int dl = 2\pi y$$

gebildet, da die Summe der Längen in Betracht kommt. Daher ist

$$f = \frac{2\pi i y^2}{10 a^3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

Das axiale Feld ändert sich also bei einer gegebenen Grösse des Kreises umgekehrt wie die dritte Potenz des Abstandes der Peripherie vom Pol. Die Formel kann man auch schreiben:

$$f = 0{,}628 \, \frac{i y^2}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Die Formel (20) lässt sich auch in anderer Weise entwickeln. Befindet sich die Poleinheit im Punkte P, so geht nur ein Theil der vom Pol austretenden strahlenförmigen Linien durch den Kreis; dieser Theil ist proportional dem Winkel, der durch einen Kegel gebildet wird, dessen Grundfläche der Kreis ist und dessen Spitze in P liegt, der Winkel beträgt also $2\pi (1 - \cos \Theta)$. Fasst der Leiter mit dem Strome i diese Linienzahl ein, so wird die Arbeit nach Formel (11) ausgedrückt durch

$$W = \frac{2\pi i (1 - \cos \Theta)}{10}$$

Die auf P ausgeübte Kraft lässt sich berechnen, wenn man den Ausdruck in Bezug auf x differenzirt, um den Betrag zu bestimmen, um den die gegenseitige Energie des Systems auf die Einheit der Länge in jener Richtung sich ändert. Zu diesem Zwecke ist zunächst für $\cos \Theta$ der Werth $\frac{x}{(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}$ einzuführen. Differenzirt man nun, so folgt:

$$\frac{dW}{dx} = \frac{2\pi i y^2}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

XVIII. Feld einer langen röhrenförmigen Wickelung.

Aus dem Werthe für die Kraft, die eine einzelne Drahtwindung hervorbringt, lässt sich durch Integration die

Digitized by Google

Wirkung einer Röhrenwickelung von gegebener Länge herleiten. Es sei eine Wickelung von n Windungen vorhanden, die eine Länge x besitzen, sodass die Zahl der Windungen für das cm $\frac{n}{x}$ beträgt. Dann ist der Beitrag, den jedes Längenelement dx bei der Stromstärke i leistet gleich $\frac{i\,n\,dx}{x}$ und die axiale Kraft im Punkte P wird

$$df = \frac{2\pi\, y^2 \cdot i\, n\, dx}{10\, r^2\, x}$$

Nun ist $$dx = \frac{r\, d\,\Theta}{\sin\Theta} \text{ und } \sin\Theta = \frac{y}{r}$$

Sonach

$$df = \frac{2\,\pi\, i\, n \sin\Theta\, d\,\Theta}{10\, x}$$

Für eine unendlich lange Wickelung ist die Integration in den Grenzen von $\Theta = 0^0$ und $\Theta = 180^0$ auszuführen

$$f = \frac{2\,\pi\, i\, n}{10\, x} \int_{\Theta=0^0}^{\Theta=180^0} \sin\Theta\, d\,\Theta$$

$$f = \frac{2\pi\, i\, n}{10\, x}\,(\cos 0^0 - \cos 180^0)$$

$$f = \frac{4\pi\, n\, i}{10\, x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Dieser Werth wurde in anderer Weise bereits unter No XIX erhalten.

XIX. Energie im magnetischen Felde.

Zur Erzeugung eines magnetischen Feldes gehört Energie; jedes Cubikcentimeter Feldraum lässt sich als ein Behältniss mit aufgespeicherter Arbeit betrachten. Zur Berechnung der Energie dürfen wir dieselben Betrachtungen anwenden, die gebräuchlich sind, wenn Energie zur Zusammendrückung von Gasen in einem Cylinder aufgewendet wird und wo anstatt einer Multiplication einer linearen Kraft mit einer Länge wir das Arbeitsproduct aus den Faktoren Druck und Volumen bilden. Befindet sich zusammengepresste Luft in einem Raume von v ccm, so dass sie einen Druck von p Dynen für das qcm erreicht, so

Digitized by Google

beträgt die Arbeit $\frac{1}{2} p v$; der mittlere Druck während des Vorganges beträgt die Hälfte des schliesslichen Druckes.

Es bestehe ein gleichmässiges magnetisches Feld zwischen den flachen Enden zweier quadratischen Magnete. Auf jedes Quadratcentimeter der Oberfläche jedes Magnetes mögen m magnetische Einheiten entfallen, die an den beiden Flächen entgegengesetztes Vorzeichen besitzen. Werden die Flächen zuerst dicht zusammen gebracht und dann von einander bis auf einen Abstand l entfernt, so ist der beschriebene Raum gleich der Oberfläche S jedes Poles multiplicirt mit l. Der gesammte Magnetismus auf jeder Oberfläche beträgt mS und wenn die Flächen nahe zusammen liegen, besitzt das Feld eine Stärke H (Linien für das qcm), sodass $\frac{H}{4\pi} = m$ ist.

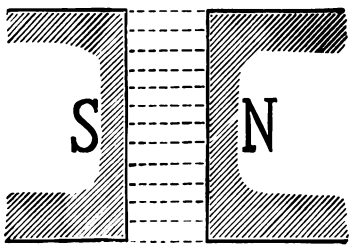


Fig. 231.

Wenn das Feld von Null bis H im Werthe zunimmt, beträgt der Durchschnittswerth des Magnetismus fur die Einheit der Oberfläche also $\frac{H}{8\pi}$. Demnach erreicht die gesammte Arbeit zur Hervorbringung des Feldes in dem Raum den Werth $\frac{H^2 lS}{8\pi}$. Dividirt man diesen Werth durch das gesammte Volumen lS, so ergibt sich als Energie für das Cubikcentimeter im Felde der Werth $\frac{H^2}{8\pi}$.

Da ferner die Energie für das ccm als das Product des magnetischen Zuges über der Endfläche des Cubikcentimeters multiplicirt mit seinem Volumen (= 1) betrachtet werden kann, so folgt, dass, wenn P die Zahl der Dynen über einer Fläche A (cm) ausdrückt, der Zug für das qcm im magnetischen Felde sich aus der Formel ergibt

$$\frac{P}{A} = \frac{H^2}{8\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (23)$$

Für den Luftraum sind die Werthe von H und B gleich, weil die Durchlässigkeit der Luft 1 beträgt. In jedem

Digitized by Google

schmalen, quer durch die magnetischen Linien gedachten Zwischenraum in einer magnetisirten Eisenmasse ist der Werth von B (oder von H) derselbe, wie im benachbarten Eisen, so dass man die Formel auch schreiben kann

$$\frac{P}{A} = \frac{B^2}{8\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (24)$$

Dies ist die Formel von Maxwell für die magnetische Tragkraft; sie lässt sich bei Berechnung der Zugkraft anwenden, die den Magnet und seinen Anker oder zwei Magnete zusammenhält. Handelt es sich indessen um einen Eisenkern in einer röhrenförmigen Wickelung, in der nach Entfernung des Kernes ein von der Wickelung herrührendes Feld verbleibt, so ist der zum Hineinziehen des Kernes nöthige Zug nicht dem Quadrate des Werthes B sondern dem Quadrate des Werthes $B—H$ proportional, und die Formel lautet dann

$$\frac{P}{A} = \frac{(B—H)^2}{8\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

Diese Formel ist für die Berechnungen bei den Versuchen mit dem Durchlässigkeitsmesser (S. 72) zur Anwendung gelangt.

V.

Über die Herstellung von Elektromagneten für Wechselstrom.

Von dem Verfasser sind neuerdings vergleichende Versuche über den Zug, den ein geblätterter Elektromagnet ausübt, wenn er mittels Gleichstrom erregt wird und wenn er mittels Wechselströmen derselben Stärke erregt wird, angestellt worden.

Der Versuchsmagnet war aus U förmigen, gestanzten Blättern weichen Eisens hergestellt, von denen jedes Blatt etwa 0,5 *mm* stark war. Der Anker war gleichfalls geblättert. Bei den in nachstehender Tafel angegebenen Versuchen bestand die Wickelung aus 163 Windungen Kupferdraht von 2,03 *mm* Durchmesser; der Anker war von den Polflächen durch eine 0,95 *mm* dicke Zwischenlage aus Holz getrennt.

Digitized by Google

Stromstärke Ampère.	Durchschnittliche Zahl der Linien auf das *qcm*.	Zug (in Gramm) bei Gleichstrom.	Zug (in Gramm) bei Wechselstrom.
8	2 300	280	280 } bei 30 Perioden
12,5	3 600	820	820 } in der Sekunde
8	2 300	280	280 } bei 60 Perioden
10,2	2 900	530	550 } in der Sekunde
3	800	60	60
4,2	1 100	100	100 } bei 90 Perioden
10,2	2 900	530	530 } in der Sekunde
21	5 600	2 400	2200
13,2	3 900	900	900 } bei 120 Perioden
21	5 600	2 400	2200 } in der Sekunde

Hieraus geht hervor, dass der Zug bei Wechselstrom genau derselbe ist, wie bei Gleichstrom (unter der Voraussetzung gleicher Stromstärken) für alle Grade der Magnetisirung, die nicht 4000–5000 Linien auf das *qcm* übersteigen.

Da demnach feststeht, dass durch dieselbe Zahl der Ampère-Windungen bis zur Erreichung des genannten Sättigungspunktes derselbe Zug hervorgebracht wird, so erübrigt noch, Regeln für die Herstellung der Wickelung von Elektromagneten für Wechselstrom anzugeben.

Ebenso wie bei Elektromagneten für Gleichstrom so hängt auch bei Elektromagneten für Wechselstrom die Zahl der Ampère-Windungen, die zur Hervorbringung einer gewünschten magnetischen Strömung erforderlich ist, von der Gestaltung des magnetischen Kreises ab. Wendet man auf einen beliebigen magnetischen Kreis, der theilweise aus Eisen, theilweise aus Luftzwischenraum besteht, die bekannten Regeln an, so lässt sich die erforderliche Anzahl von Ampère-Windungen vorausbestimmen. Aus diesem Werth ist die Wickelung herzuleiten. Weitere in die Rechnung eintretenden Grössen sind: 1) die Spannung; 2) die Wechselzahl und 3) ein Coefficient, den man als „die Selbstinduction einer einzelnen Windung“ bezeichnen darf und der zweckmässig in jedem einzelnen Falle durch einen Versuch zu bestimmen ist. —

Stehen Wechselströme von gegebener Spannung zur Verfügung und soll mittels einer Wickelung in einem gegebenen magnetischen Stromkreise eine bestimmte Zahl von Ampère-Windungen hervorgebracht werden, so setzt die allgemeine Lösung der Aufgabe voraus, dass sowohl der Widerstand als auch die

Digitized by Google

Selbstinduction der herzustellenden Wickelung in Betracht gezogen werden. Denn es gibt viele verschiedene Arten, in denen man die Erregung von gewünschter Stärke durch Anwendung von Wickelungen mit verschiedenen Widerständen und Windungszahlen erreichen kann. Ist aber der Widerstand der Wickelung im Vergleich zur Widerstandswirkung der Selbstinduction ($2\pi n L$) verschwindend gering, so gibt es nur eine Lösung der Aufgabe zur Bestimmung der Anzahl der Windungen, andernfalls sind verschiedene Lösungen möglich. Ist der Widerstand gering und die Widerstandswirkung $2\pi n L$ gross, so entsteht ein bedeutender Phasenunterschied zwischen dem Verlauf der Spannung und Stromstärke, der nutzlose Strom ist gross, der Wirkungsgrad hoch.

Der Wechselstrom besitze die Spannung von V Volt, die Stromstärke (wie solche mittels eines Elektrodynamometers oder eines anderen passenden Strommessers zu bestimmen ist) sei i. Die Zahl der gewünschten Ampère-Windungen sei Z und die gesuchte Windungszahl W, sodass $Z = Wi$ ist. Der Widerstand der gewünschten Wickelung sei R Ohm, der Coefficient der Selbstinduction L Henry, die Wechselzahl betrage n Perioden in der Sekunde. Die Widerstandswirkung der Selbstinduction ist demnach $2\pi n L$; dieser Werth werde mit $p L$ bezeichnet. Der scheinbare Widerstand der Wickelung beträgt $\sqrt{R^2 + p^2 L^2}$. Die Beziehung zwischen Spannung, Widerstand und Stromstärke ergibt sich demnach aus der Gleichung

$$V = i\sqrt{R^2 + p^2 L^2}$$

Der Winkel des Phasenunterschiedes zwischen Strom und Spannung, der mit φ bezeichnet werde, ist ein solcher, dass $tg\,\varphi = p\frac{L}{R}$, und

$\sin\varphi = \frac{p L}{\sqrt{R^2 + p^2 L^2}}$ ist.

Hieraus folgt

$$V \sin\varphi = ipL \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

L ist proportional dem Quadrat der Windungszahl und kann durch $k W^2$ ausgedrückt werden, wenn k den Coefficient der Selbstinduction einer einzelnen Windung bedeutet. Demnach ist

$$i p L = i k p W^2 = k p W Z.$$

Daraus und aus (1) leiten wir ab:

$$W = \frac{V \cdot \sin\varphi}{k p Z} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Digitized by Google

und erhalten somit den gesuchten Werth. Für Z ergibt sich aus (2) der Werth:

$$Z = \frac{V \sin \varphi}{k p W} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

Ist V, k und p gleichbleibend, so wird auch eine gleichbleibende Erregung Z hervorgebracht, falls W mit dem sin φ sich ändert. Man kann also von vornherein den Phasenunterschied wählen und dementsprechend Widerstand sowie Selbstinduction ändern. Aus Gleichung (3) erhellt, dass, da sin φ alle Werthe von 0 bis 1 durchlaufen kann, ein Maximum für die Windungszahl sich ergeben wird, das nicht überschritten werden darf, wenn man die vorgeschriebene Zahl Ampère-Windungen erhalten will. Das Maximum tritt ein, wenn sin $\varphi = 1$ ist, oder wenn der Widerstand R gegen pL verschwindend klein ist, alsdann ist

$$W = \frac{V}{k p Z.} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) folgt, dass unter sonst gleicheu Umständen die Erregung umgekehrt proportional der Windungszahl ist. Auf den ersten Blick erscheint dies eigentümlich, es erklärt sich aber leicht durch die Erwägung, dass die Selbstinduction und dementsprechend die Herabminderung der Stromstärke dem Quadrate der Windungszahl proportional ist. Wenn man demnach die Windungen vermehrt, um die Erregung zu vergrössern, so vermindert sich die Stromstärke in nahezu wiederholtem Verhältniss. Dies ist eigentlich der Schlüssel für den Entwurf von Elektromagneten für Wechselstrom.

Die Grösse k ist durch Versuche zu bestimmen. Man wickelt zu diesem Zwecke auf den Kern eine Versuchswickelung mit bekannter Windungszahl w und von bekanntem Widerstand r. Unter Verwendung dieser Wickelung misst man die Stromstärke i bei einer Spannung v und einer Wechselzahl n. Während dieses Versuches muss der Anker mittels der hölzernen Zwischenlagen in der Stellung, die er später einzunehmen hat, festgelegt werden. Der Coefficient der Selbstinduction der Versuchswickelung ist dann

$$l = \frac{\sqrt{v^2 - i^2 r^2}}{4 \pi^2 n^2 i^2}$$

und

$$k = \frac{l}{w^2}$$

Digitized by Google

Der Werth des Factors sin φ kann in den meisten praktischen Fällen gleich 1 angenommen werden, weil bei den gebräuchlichen Wechselzahlen und bei Wickelungen mit Eisenkernen keine Schwierigkeit besteht, den Widerstand im Vergleich zur Widerstandswirkung der Selbstinduction verschwindend klein zu halten. Die Regel zur Berechnung der Wickelung ergibt sich daher aus der einfachen Formel (4). Ist danach W berechnet worden, so findet man die Stromstärke aus der Gleichung $i = \frac{Z}{W}$. Ist Raum genug vorhanden (meistens wird dies der Fall sein), so kann man stärkeren Draht verwenden, als zur Fortleitung des Stromes erforderlich ist; man erlangt indessen keinen Vortheil, wenn stärkerer Draht verwendet wird, als zur genügenden Herabminderung von R erforderlich ist. —

Die nachstehenden Ergebnisse entstammen einem Versuche. Der U förmige Eisenkern war mit einer Versuchswickelung von 140 Windungen aus 1,22 *mm* starkem Drahte belegt, um den Faktor k zu bestimmen. Der Anker wurde in Abständen von 9,52, 6,35, 3,17 und 0 *mm* von den Polen festgelegt. Der Widerstand des warmen Drahtes bei 12 Am. betrug 0,3 Ohm, die Wechselzahl 93 Perioden in der Sekunde. Die vierte und fünfte Spalte der Tafel sind nach der vorhin mitgetheilten Formel ausgerechnet, bei dem ersten Versuch ergibt sich z. B. folgende Rechnung:

$$l = \frac{\sqrt{31^2 - (12 \,.\, 0{,}3)^2}}{2\pi \,.\, 93 \,.\, 12} = 0{,}00434$$

$$k = \frac{0{,}00434}{140^2} = 0{,}221 \,.\, 10^{-6}$$

Luft-zwischenraum. *mm*	Klemmen-spannung.	Stromstärke.	Coefficient der Selbstinduction. l	Selbstinduction einer einzelnen Windung.
9,52	31	12	0,00434	$0{,}221 \,.\, 10^{-6}$
6,35	35,6	12	0,005	$0{,}225 \,.\, 10^{-6}$
3,17	46,8	12	0,00658	$0{,}336 \,.\, 10^{-6}$
0	51	2,76	0,033	$1{,}68 \,.\, 10^{-6}$

Angenommen, k sei bestimmt und es solle nunmehr eine Wickelung hergestellt werden, die 2400 Ampère-Windungen hervorbringt,

Digitized by Google

wenn der Anker 9,52 *mm* von den Polen absteht, und wenn eine Spannung von 50 Volt bei derselben Wechselzahl (93) angewendet wird. Nach Gleichung (4) ergibt sich:

$$W = \frac{50}{0{,}221 \,.\, 10^{-6} \,.\, 2 \,.\, 3{,}1416 \,.\, 93 \,.\, 2400} = 163.$$

Demnach sind 163 Windungen des 2,03 *mm* starken Drahtes auf den Kern zu bringen. Der dann unter den vorgeschriebenen Bedingungen entstehende Strom wurde auf 14,9 Am. bestimmt. Die Wickelung erzielte also eine Erregung von 14,9 . 163 = 24 0 Ampère-Windungen. Dies ist ein so genügender Näherungswerth, wie er bei Anwendung gewöhnlicher technischer Messinstrumente erwartet werden darf.

Schliesslich lässt sich ein sehr einfacher Ausdruck für die Windungszahl W aus dem Mittelwerth der magnetischen Strömung N im Eisen herleiten. Wenn Eisen mit dem Querschnitt A Kreisläufen der Magnetisirung ausgesetzt wird, in denen der Mittelwerth B herrscht, so ist die mittlere Strömung $N = AB$. Beträgt die Wechselzahl n Perioden in der Sekunde, so ist die in W Windungen selbst inducirte elektromotorische Kraft gleich $\frac{2\pi n W N}{10^8}$ Volt. Ist der Widerstand zu vernachlässigen, so lässt sich dies gleich der mittleren Spannung V der Stromquelle setzen und es folgt

$$W = \frac{10^8 V}{\beta N} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Beispiel. Es soll eine Induction von 4000 Linien anf das *qcm* erzeugt werden, sodass bei einer Fläche von 6,5 *qcm* die gesammte Zahl der Linien 4000 . 6,5 = 26000 beträgt. Wirkt eine Spannung von 50 Volt und ist die Periodenzahl gleich 93 in der Sekunde, so ergibt die Formnl (5) den Werth

$$W = 329$$

Ein geschätzter Vortheil des Elektromagnetes für Wechselstrom liegt in der grösseren Constanz des Zuges, der in einem gegebenen Bereich ausgeübt wird. Wird dieselbe Spannung beibehalten, so wird ein sehr gleichförmiger Zug innerhalb eines bedeutenden Bereiches ausgeübt, anstatt dass, wie bei gewöhnlichen Elektromagneten eine Zunahme des Zuges bei Annäherung des Ankers an die Pole Statt findet. Der Grund hierfür liegt darin, dass, sowie der Anker sich nähert (und den Widerstand des magne-

Digitized by Google

tischen Kreises verringert), der Coefficient der Selbstinduction der Wickelung aus demselben Grunde grösser wird, dadurch den scheinbaren Widerstand erhöht und die Stromstärke herabdrückt. Die Ampère-Windungen vermindern sich mit Herabminderung des magnetischen Widerstandes, deshalb bleibt die Magnetisirung und der Zug gleich. Ganz genau würde Letzteres zutreffen, wenn keine Zerstreuung der magnetischen Linien Statt fände und die Wickelung keinen Widerstand besässe.

Digitized by Google

Tafel zur Berechnung der Drahtdurchmesser und der zulässigen Stromstärken.

Abmessungen					Zulässige Stromstärke, wahrscheinliche Erwärmung und zulässige Wickelungsdicke											
Englische S.W.G. Drahtlehre	Durchmesser in *mm*	Querschnitt in Quadratmillimetern (nackt)	Zahl der Windungen auf 1 *cm* Länge (bedeckt)	Zahl der Windungen auf das Quadratcentimeter (bedeckt)	Bei 1000 Ampère auf 6,45 *qcm* (= auf 1 Quadratzoll englisch) oder 1,55 Ampère auf 1 *qmm*			Bei 2000 Ampère auf 6,45 *qcm* (= auf 1 Quadratzoll englisch) oder 3,1 Ampère auf 1 *qmm*			Bei 3000 Ampère auf 6,45 *qcm* (= auf 1 Quadratzoll englisch) oder 4,65 Ampère auf 1 *qmm*			Bei 4000 Ampère auf 6,45 *qcm* (= auf 1 Quadratzoll englisch) oder 6,2 Ampère auf 1 *qmm*		
					A.	*C.*	*D.*	*A.*	*C.*	*D.*	*A.*	*C.*	*D.*	*A.*	*C.*	*D.*
22	0,711	0,3970	9,37	96,7	0,616	1,27	11,4	1,23	5,11	2,87	1,85	11,4	1,27	2,46	20,3	0,71
20	0,914	0,6561	7,87	68,2	1,018	1,77	9,9	2,036	7,07	2,34	3,05	15,9	1,09	4,07	28,3	0,61
19	1,016	0,8044	7,28	58,4	1,26	1,98	9,1	2,52	7,89	2,21	3,78	17,8	1,04	5,04	31,7	0,58
18	1,219	1,1652	6,34	44,3	1,81	2,58	8,4	3,62	10,3	2,11	5.43	23,2	0,94	7,24	41,2	0,53
17	1,422	1,4881	5,62	34,7	2,4	3,04	8,1	4,8	12,2	2,01	7,2	27,3	0,89	9,6	48,6	0,48
16	1,625	2,0714	5,05	28,1	3,2	3,65	7,6	6,4	14,6	1,88	9,6	32,9	0,84	12,8	58,4	0,46
15	1,828	2,6245	4,58	23,1	4,0	4,11	7,4	8,0	16,4	1,83	12,0	37,0	0,81	16,0	65,8	0,43
14	2,032	3,2498	4,19	19,2	5,0	4,70	7,1	10,0	18,8	1,78	15,0	42,4	0,79	20,0	75,2	0,43
13	2,337	4,2895	3,72	15,2	6,6	5,54	6,9	13,2	22,2	1,70	19,8	49,8	0,76	26,4	88,6	0,41
12	2,642	5,4863	3,34	12,3	8,5	6,41	6,6	17,0	25,3	1,65	25,5	57,7	0,74	34,0	102,4	0,41
11	2,946	6,7164	3,04	10,1	10,5	7,01	6,4	21.0	28,5	1,60	31,5	64,0	0,71	42,0	113,8	0,41
10	3,251	8,2958	2,78	8,4	12,8	7,09	6,1	25,6	31,8	1,55	38,4	71,5	0,69	51,2	127,1	0,38
9	3,658	10,5209	2,49	6,8	16,3	9,01	6,1	32,6	36,4	1,52	48,9	82,0	0,69	65,2	145,8	0,38
8	4,064	12,9781	2,26	5,6	20,1	10,02	5,8	40,2	40,9	1,50	60,3	92,0	0,66	80,4	163,6	0,38
7	4,470	15,6929	2,07	4,7	24,3	11,03	5,8	48,6	45,4	1,47	72,9	102,0	0,66	97,2	181,3	0,38
geseilt 7/22	2,133	2,7790	3,78	15,8	4,3	3,74	10,2	8,06	15,0	2,51	12,9	13,7	1,22	17,2	59,8	0,64

Digitized by Google

7/20	2,742	4,5927	3,07	10,4	7,13	4,97	9,4	14,3	19,8	2,34	21,4	44,7	1,12	28,6	70,4	0,58
7/18	3,657	8,1564	2,40	6,32	12,7	6,89	8,6	25,4	27,6	2,11	38,1	62,0	0,99	50.8	110,2	0,53
7/16	4,875	14,4998	2,01	4,43	22,9	9,56	8,1	45,8	38,2	2,01	68,7	85,8	0,89	91,6	152,6	0,51
7/15	5,484	18,3715	1,69	3,15	28,9	10,8	7,9	57,8	43,3	1,98	86,7	97,4	0,86	115,6	173,2	0,51
7/14	6,096	22,7486	1,53	2,56	35,6	12,8	7,9	71,2	48,4	1,93	106,8	108,8	0,86	142,4	193,5	0,48
7/13	7,011	30,0265	1,33	1,96	46,2	13,2	7,6	92,4	54,9	1,88	138,6	123,5	0 84	184,8	219,6	0,48
7/12	7,926	38,4041	1,19	1,54	59,5	15,8	7,4	173,0	63,3	1,83	178,5	142,5	0,81	238,0	253,3	0,46

Die Angaben in den mit *A* bezeichneten Spalte bedeuten die Anzahl Ampère, die der Draht führt.

Die Angaben in der mit *C* bezeichneten Spalte bedeuten die Anzahl Grade (Celsius), um die der Draht erwärmt wird, wenn nur eine einzige Schicht von Draht vorhanden ist und unter der Voraussetzung, dass die Hitze von der äusseren Oberfläche der Umwickelung ausgesandt wird; sie ist nach der folgenden Abänderung der Forbes'schen Regel ausgerechnet:

Erhöhung der Temperatur (in Fahrenheit's Graden) = 225 × der Anzahl Watt die von einem Quadratzoll englisch hergegebenen Wärme.
= 159 × der Querschnittsfläche × der Anzahl Ampèrewindungen auf 1 Zoll englisch (bei 1000 Ampère auf 1 Quadratzoll).

Die Angaben in den mit *D* bezeichneten Spalten bedeuten die Dicken in *cm*, bis zu welchen der Draht aufgewickelt werden kann, wenn ein Watt auf jeden Quadratzoll (engl.) der ausstrahlenden Fläche in Verlust geht, wobei nur die Aussenseite der strahlenden Oberfläche der Spule in Betracht kommt.

Regel zur Berechnung einer siebenfach geseilten Litze: Durchmesser der Litze = 1,134 × Durchmesser eines gleichwerthigen runden Drahtes.

Die Angaben unter der Kopfbezeichnung „Zahl der Windungen auf 1 *qcm*" sind für mit Seide umsponnenen Draht von mittlerer Dicke der Umspinnung für die verschiedenen Drahtsorten berechnet, nämlich 0,3556 *mm* an Durchmesser mehr bei runden Drähten (von No. 22 ab) und 0,508 *mm* bei verseilten oder quadratischen Drähten.

Die Angaben unter der Kopfbezeichnung „Zahl der Windungen auf das Quadratcentimeter" sind nach dem Vorhergehenden berechnet, wobei 10% für die Einbettung der Lagen zugegeben wurde.

Der Widerstand einer Kupferdrahtspule, die v Cubikcentimeter des Umwickelungsraumes einnimmt und bei welcher die Drahtstärke d Millimeter nackt und D Millimeter umsponnen ist, kann annäherungsweise durch folgende Formel berechnet werden:

$$\text{Ohm} = 0{,}024\,402\,\frac{v}{D^2 \cdot d^2} \quad \text{oder rund} = \frac{v}{41 \cdot D^2 \cdot d^2}$$

Die Angaben hinsichtlich des Querschnittes der Drähte von verschiedener Stärke sind von der London Electric Wire Company geliefert.

Digitized by Google

Digitized by Google

Sachregister.

A.

Abfall des Magnetismus, Verhinderung des 357.
Abgleich für Elektromagnete 241, 246.
— von Froment u. Roux 249.
— von Wheatstone. Thomson-Houston und Hjörth 250, 265.
Abgleichung, astatische 368.
Abmessungen, ungewöhnliche 26.
Abrundung der Pole 118.
Abschaltung durch einen Condensator 329.
— mit einem Voltameter 330.
— durch einen Widerstand 328.
— mit flüssigem Widerstande 330.
Abstossung, elektromagnetische 241, 243, 253, 294, 300.
— zweier Magnetpole, Gesetz 379, 391.
Abstossungskraft, Grösse der 258.
Abzweigung des Stromes 247.
Adhäsion, elektromagnetische 270, 275.
Ampère 377, 380.
Ampère-Windungen 41, 75, 92, 102, 104, 110, 115, 116, 144, 156, 159, 171, 172, 174, 187, 189, 219, 225, 232, 234, 311, 387, 388, 398, 408, 410, 412.
Änderung des Magnetismus, Grösse der 298.
Anfängliche Magnetisirung 257, 259.
Angriffsfläche 118.
Anker, Annäherung von der Seite 156, 242, 250.
— Ansätze 238.
— drehbar 242.
— — am Pole 250, 258, 279.
Anker, Erörterung von Du Moncel 165.
— Ersatz durch Dauermagnete 258.
— beste Form 163, 165.
— von Froment 242.
— Lage und Form 164, 206, 208, 209.
— Länge des 164, 191.
— polarisirter 256, 257, 258.
— unmagnetisches Material am 98.
— Wirkung auf den 32, 116, 129, 142, 156.
Anlassen von Stahl 344.
Annäherung, schräge, Einrichtung von Froment 250.
Anordnung 108.
— von Dujardin 329.
Anschlagfedern 241, 247.
Anzeigeapparate, elektrische 278.
Anzeiger von Moseley 280.
Anziehung 19, 45, 71, 109, 113, 126, 145, 164, 166, 186, 187, 212, 213, 216, 220, 222, 225, 227, 231, 246, 258, 300, 391.
— Abgleichung 246.
— und Abstossung von Stromleitern 295.
— Berechnung der 145.
— bei Berührung 109, 131, 135, 186.
— Gesetz der 138.
— auf den Kern, Angabe von Hankel 225, Angabe von Dub 226.
— Messung der 166.
— im Mittelpunkte 135.
— am Rande 134, 135, 136, 165.
— Beziehung zur Zerstreuung 147.
Apparate 122, 240, 246, 253, 265, 278.
— für Adhäsionswirkung 242.
— von Ayrton 122.
— „ Colombat 278.

Digitized by Google

Apparat von Davy 246.
— von Du Moncel 252.
— „ Maikoff und De Kabath 253.
— mit schwingenden Theilen 241, 264, 282.
— mit umlaufenden Theilen 242, 264.
— von Waterhouse 265.
Astatische Anordnungen 367.
Aufhängung, bifilare 128.
Aufnahmefähigkeit für Kraftlinien 161, 162, 386, 389.
Ausdehnung, polare, am Eisenkern 129.
Ausgleich der magnetisirenden Kraft 332.
— der Selbstinduction 333.
— magnet 367.
Auslesemaschine von Edison 275.
Auslösung 207.
Ausschaltung von Elektromagneten 247.
Ausscheidungsapparate, magnetische 242.

B.

Ballistisches Galvanometer 107, 123, 148, 185.
Batterie von Sturgeon 3, 4.
Batterieschaltung für schnellste Wirkung 199.
Batteriewiderstand 199.
Bauart 109, 177, 180, 184, 189.
— Missgriffe in der 180.
Behandlung der Magnete 366.
Beharrungsvermögen, elektromagnetisches 178, 284.
Beleuchtungssystem, Elektromagnete in einem 172.
Berechnung der Bewickelung, Regel von Sir W. Thompson 174.
Berührung, Anziehung bei 109, 131, 135, 186.
— von Pol und Anker 108.
Berührungsfläche 108, 116, 118, 119, 165.
Beseitigung des magnetischen Rückstandes nach Hecquet 97.
Beständigkeit der Magnete 350, 355.
— Einfluss von Dampf auf die 358.
Betrag des magnetischen Rückstandes nach Ritchie 160.
Bewegungsbereich 246, 248.
Bewegungsphase, Angabe von Lord Rayleigh 288.
Bifilare Aufhängung 128.
Blättermagnet 163, 191, 196, 208, 240, 292, 308, 362, 407.
Blätterung, Art der 293, 362.
Blechstreifen, Kern aus 208, 239.
Blocksystem 252.
Bogenlampe von Brockie-Pell 234.
— von Brush 236.
— „ Duboscq 248.
— „ Dubrava 262.
— „ Gaiffe 231.
— „ Gülcher 278.
— „ Rankin Kennedy 237.
— „ Krizik 229, 233.
— „ Menges 234.
— „ Paterson und Cooper 232, 250.
— „ Serrin 248, 249.
— „ Weston 237.
Bohrer für Bergbau 323.
— für Zahnärzte 320.
Bohrmaschinen von Rowan 322.
Bremsen 277.
— magnetische 242.

C.

CGS System 377.
Capacität eines Condensators, Wirkung der 330.
Centraler Pol 263.
Chemische Zusammensetzung des Materials 344, 350.
Chromstahl 341, 344.
Chronographen 207.
Circular-Elektromagnet von Weber 270.
Coefficient der Selbstinduction 306, 325, 327, 332, 385, 410, 413.
— — Bestimmung des 306.
— der Zerstreuung 152, 385, 389.
Coërcivkraft 85, 87, 91, 340, 350.
Compassnadeln, Anfertigung 340, 350.
— Wirkung auf eine 124, 130, 141, 142, 147, 257, 264, 401.
Compensationsmagnet 367.
Condensator, Abschaltung durch einen 329.

Digitized by Google

Condensator im Nebenschluss 329, 333.
Contactsäule 285.
Contact, unregelmässiger 289.
Curve der Änderung der Anziehung 216, 233.
Curven von Ewing 82, 86.
— von v. Feilitzsch 157.
— des Magnetismus für den bewegten Kern 219, 223, 227, 228.
— des verschwindenden Magnetismus 210.
— der Wellenbewegung von Wechselströmen 295.

D.

Dampf, Einfluss, des auf die Beständigkeit 358.
Dämpfer, metallene 205, 242, 304.
Dämpfung der Ströme durch Elektromagnete 307.
Dauermagnete 91, 96, 113, 128, 163, 184, 205, 216, 246, 255, 256, 258, 261, 262, 266, 271, 288, 340, 355, 357, 362.
— Ersatz einfacher Anker durch 258.
— gekrümmte 280.
— Zweck der Verwendung 255.
Dauermagnetisirung, Höchstwerthe der 342.
Dauermagnetismus 85, 95, 259, 260, 344, 355.
— und chemische Zusammensetzung 344.
— Einfluss der Form auf 344.
— Einfluss des Kornes auf 344.
— Vernichtung des 186.
Dauerpol 219.
Daumenabgleich 241.
Daumen, elektromagnetische 241, 243, 251.
Daumenanker von Wheatstone 241.
Diamagnetismus 235, 294, 368.
Differentialwickelung 232, 241, 286, 331.
— mit Kern zum Eintauchen von Siemens 232.
Differentialwirkung 237.
Doppelsprechen, telegraphisches 256.
Doppelstrich 355.
Draht, Erwärmung 110, 111, 159, 167, 188.
— Isolation 57, 176, 182, 204, 331.
— Länge 173.
— Menge 167.
— Stärke 111, 112, 167, 173, 182, 197.
— von abgestufter Stärke 174.
— Widerstand 167, 169, 182, 204.
Drähte, Nebeneinanderschaltung von 174.
Drehbewegung 305.
Dreipoliger Elektromagnet 180, 280, 312.
Druck, elektrischer 381.
Durchlässigkeit 60, 63, 72, 73, 81, 82, 99, 102, 104, 109, 110, 116, 122, 144, 152, 155, 160, 261, 294, 308, 387, 389.
— Berechnung der aus dem Werthe B. 386.
— Grenze der 73.
— Messer 72, 399, 407.
Durchschlagsentfernung 330.
Dyn 378.
Dynamomaschinen, Elektromagnete für 210.
— Entwurf von 151, 169.

E.

Einrichtungen für Wechselstrom 242.
Einschenkeliger Elektromagnet 47, 189, 240.
Eintauchen des Kernes 50, 51, 210, 211, 216, 219, 221, 225, 228, 232, 233, 234, 238, 240, 241, 242, 259, 280, 294, 302.
— Spule zum 232, 234.
Einwirkung auf einen Kupferring 298.
Eisen, α und β Zustand 351.
— Durchlässigkeit 103, 385.
— Eigenschaften 60, 144, 160, 340, 341, 351, 386.
— Hülle 48, 231, 275, 277, 317.
— Kugel, Wirkung des magnetischen Feldes auf eine 235.
— Länge 109, 110.
— magnetische Leitungsfähigkeit 144.
— Magnetisirung in starken magnetischen Feldern 355.

Digitized by Google

Eisen-Massen auf den Kernenden 124.
— — Wirkung fester 124.
— Querschnitt 109, 112, 386.
— Röhre als Kern 129, 191, 226, 230, 241, 280.
— Stücke, Eigenschaften kurzer 95.
— umkleidete Elektromagnete 130, 240, 275, 277, 231, 237, 238, 239, 317.
— Widerstand 54.
Eisenbahn-Blocksystem von Tyer und von Ayrton und Perry 252.
Eisenbahnbremsen 277.
— von Forbes und Timmis 277.
Eisendrahtspule von Trève 231.
Elektricitätsmenge, aufgespeicherte, Berechnung der 326.
Elektrische Einheiten 376.
Elektrischer Hammer von Marcel Deprez 235, 321.
Elektrische Triebmaschine 18, 211, 213, 214, 235, 237, 313, 314, 315, 316, 317.
Elektrodiapason von Mercadier und Lacour 288.
Elektromagnet von Ayrton und Perry 239.
— von Becquerel 28.
— „ Shelford Bidwell 254, 255.
— billiger 188, 189.
— für Bogenlampen 331.
— von Bonelli 236.
— „ Brown und Williams 254.
— „ Marcel Deprez 208, 209.
— dreipoliger 180, 280, 312.
— Einheitliche Richtung der Bewegung 255.
— ohne Eisen 187.
— eisenumkleideter 130, 231, 237, 238, 239, 240, 275. 277, 317.
— Empfindlichkeit der Wirkung 259, 266, 269, 279.
— Erhöhung der mechanischen Wirkung des Stromes 261.
— von Faraday 26.
— fehlerhafte 180, 186.
— von Feilitzsch und Holtz 27.
— für grösste Fernewirkung 187.
— von Forbes 114.
Elektromagnet mit fortlaufenden spiraligen Polen 274.
— von Froment 317.
— von Gaiser 239.
— Gegenseitige Wirkung 241.
— Geschwindigkeit der Wirkung 259.
— von geringstem Gewicht 188.
— grosse 188, 210, 299.
— von Grüning 334.
— in der Heilkunst 334.
— für Heizzwecke 311.
— von Henry 15.
— „ Higgins 205.
— „ Hjörth 213, 256.
— „ Hirschberg 336.
— hohler 213.
— von Hughes 163, 207, 209, 241, 260, 262, 263.
— von Joule 23.
— kleiner 207.
— kreisförmiger 52.
— leicht herstellbarer 189.
— von Moll 6.
— „ Newton 114.
— „ Pellin 253.
— „ Plücker 26, 135.
— „ Radford 23.
— „ Rapieff 252.
— „ Ricco 187.
— „ Roberts 23.
— „ Roloff 180, 238.
— „ Ruhmkorff 49, 353.
— saugender 211.
— schnellarbeitender 184, 192.
— für schnell veränderliche Ströme 191.
— von Smith 209.
— „ Holroyd Smith 238.
— „ Snell 335.
— „ Sturgeon 2, 147.
— „ Timmis und Currie 238.
— „ S. P. Thompson 28.
— „ Tatham Thompson 336.
— für grösste Tragkraft 186.
— von Varley 48.
— „ Verdet 49.
— „ Watkins 6.
— „ Weber 271.
— für Wechselstrom 293, 294, 308, 407.

Digitized by Google

Elektromagnet für Wechselstrom, Eigenschaften 294.
— für langsame Wirkung 197.
— für schnellste Wirkung 192, 207.
— Wirkungsbereich 212.
— mit weitem Wirkungsbereich 236.
Elektromotorische Kraft 93, 191, 192, 196, 197, 284, 299, 305, 325, 327, 330, 332, 381, 384.
— — Einheit der 381.
Empfindlichkeit der Wirkung eines Elektromagnetes 259, 266, 269, 279.
Energie, aufgespeicherte 326
— im magnetischen Felde 405.
— Verlust 167, 412.
Entladungen 327, 329, 331.
Entmagnetisirender Strom 359.
Entmagnetisirung des Eisens 95, 362.
Entwerfen von Elektromagneten 159, 389, 407.
Erdmagnetismus, Einfluss des 367.
— horizontale Seitenkraft (H) 379, 382.
Erhöhung der mechanischen Wirkung des Stromes 261.
Erschütterung, Verlust an Magnetismus durch 357, 366.
Erwärmung des Drahtes 110, 111, 159, 167, 188.
— Energieverlust 412.
— Grad der 170.
— der Spule 170, 171, 188.
— Wirkung der 82, 169, 188.
Extrastrom 198, 202, 325, 329, 330, 332.

F.

Fall, Verlust an Magnetismus durch 357.
Fallscheibentafeln 189.
Federn als Gegenkraft 241, 245, 260, 279, 283.
Federstahl 342.
Fehlerhafte Elektromagnete 180, 186.
Feld einer langen röhrenförmigen Wickelung 404.
Feldmagnet 180, 188, 313, 317, 319, 330.
— von Edison 180.
— „ Gramme 180.
— „ Mordey 319.
— „ Ritchie 313.
Feldstärke 40, 381, 395, 396, 400, 402, 406.
Fernewirkung, grösste 187.
Fernsprech-Empfangsapparate 261, 263, 268.
Fernsprecher von Ader 263.
— von Bell 263.
— „ D'Arsonval 263.
— mit magnetischem Nebenschluss 268.
Flüssigkeit, Unterbrechung des Stromkreises 328.
Folgepole 2, 51, 136, 240, 321.
Formel von Brough 182.
— von Forbes 151, 153.
— „ Helmholtz 192, 196.
Formen 46, 163, 189.
— Angabe von Nicklès 46.
— Einfluss der auf den Dauermagnetismus 344.
Freier Magnetismus 121.
Frictionsgetriebe, magnetische 242.
Funken, Ausblasen der 328.
— Auswischen der 328.
— Unterdrückung der, durch elektrische Einrichtungen 328.
— Unterdrückung der, durch mechanische Einrichtungen 327.
— Vergleich von 332.
Funkenbildung 210, 284, 285, 324, 327, 328, 332.
— Ursachen der 324.
— Verhütung 285, 324.

G.

Galvanometer, ballistisches 107, 123, 148, 185.
— von Robertson, Maxwell u. D'Arsonval 262.
Gegenkräfte, Wirkung von 241, 245, 260, 279, 283, 284.
Gegensatz zwischen Elektromagneten und Dauermagneten 184.
Gegenseitige Anziehung 19, 45, 71.
— Entmagnetisirung 362.
— Induction 330.
— Wirkung von Elektromagneten 241.
— — zweier Punktpole 391.
— — eines Punktpoles und eines Stromelements 391, 392.
— — von Stromelementen 392, 393.

Digitized by Google

Gelenkbewegungen 241.
Gelenke, elektromagnetische 241, 251.
— mechanische 248.
Geschwindigkeit des Arbeitens von Apparaten 259.
— der Wirkung eines Elektromagnetes 259.
Gesetz allg. elektromagnetischer Systeme 242.
Gestaltung eines elektromagnetischen Systems 244.
Gewicht als Gegenkraft 241, 246.
— von Magneten 112, 188.
Geschichtliches 1.
Glasharte Magnete 355, 358.
Gleichgewichtsmethode 63.
Gleichstrommaschinen 317.
Glockenform, Wecker in 190.
Gramme'scher Ring 51, 317.
Grad der Erwärmung 170.
Grundgesetze des Elektromagnetismus 390.
Grundsatz von Poisson und Weber 93.
Gusseisen, Durchlässigkeit 386.
— Untersuchung von 341.
— Verwendung von 188.

H.

Häcker'sche Regel 113.
Hammer von Marcel Deprez 235, 321.
Harlemer Magnete 364.
Harmonischer Telegraph 282, 291.
— — von Varley, Lacour, Gray und Langdon-Davies 291.
Härtegrad, Beziehung zum Verlust an Magnetismus 358.
Härten von Stahl 344, 354, 362.
Hebekraft von Magneten 363.
Hebel, schwingende 241.
Heberschreibapparat 262.
Heilkunst, Elektromagnet in der 334.
Heizzwecke, Elektromagnete für 311.
Hemmende Wirkung der Selbstinduction 329, 385, 409, 411, 412.
Hemmung, magnetische 242, 261, 266.
Henry 384, 409.
Herstellung von Elektromagneten 54, 353, 359.
Hintereinanderschaltung von Spulen 198, 200, 201, 202, 232.
Hufeisenmagnet 2, 24, 47, 78, 96, 109, 113, 117, 144, 148, 159, 165, 166, 171, 179, 184, 186, 189, 198, 202, 213, 236, 257, 259, 260, 263, 265, 266, 275, 279, 282, 288, 293, 310, 353, 363, 366.
Hughes-Apparat 202.
— Elektromagnet 163, 207, 209, 241, 260, 262, 263.
Hülse, Wirkung der 205, 330, 332.
— Isolation der 58.
Hysteresis 86, 90, 93, 94, 99, 196, 206, 310, 412.
— zähe, 94, 196.

I.

Inclinationslinie, Drehbare Aufstellung einer Magnetnadel in der 367.
Inductance 309.
Inducirte Magnetisirung 98.
— Pole 145.
Induction 40, 61, 191, 197, 210, 284, 303, 330, 384, 385.
— von Wirbelströmen 303.
Inductionsspule 178, 233, 282, 325.
— mit schwingender Vorrichtung 286.
Inductionsströme 196, 233, 300, 327.
Inductionsmethode 63.
Innere Magnetisirung 40, 61, 85, 232, 385.
Intermittirende Ströme 191.
Joch 47, 78, 136, 155, 163, 180, 189, 202, 208, 209, 237, 341.
Isolation des Drahtes 57, 176, 182, 204, 331.
— feuersichere, 58, 188.
— der Lagen 57.
— gegen hohe Spannung 59.
Isolationsmaterial 55, 103, 175, 188.
— Wirkung der Spannung 175.

K.

Kälte, Wirkung auf den Magnetismus 360.
Keilförmiger Polschuh 305.
Kerne 50, 51, 54, 58, 97, 119, 124 129, 159, 162, 187, 203, 210, 386, 388.
— Aufschlitzen der 191, 206.

Digitized by Google

Kerne. Ausdehnung von 241.
— Befestigung an einem Stahlmagnet 256.
— aus Blechstreifen 208, 239.
— drehbarer 266.
— dünne 172.
— zum Eintauchen, Berechnung der Wirkung der Spule auf den 216, 221.
— — besondere Formen 241, 242, 259.
— — Differentialwickelung 232.
— — hufeisenförmige 225.
— — konische 228, 233, 302.
— — massive und hohle 230.
— hohle 161, 191, 230.
— Isolation des 58.
Kerne, lange und kurze 159, 205, 206, 215, 219, 235.
— Länge 110.
— magnetischer Widerstand 387.
— Material zu 188, 219.
— parallele 180, 253.
— polare Ausdehnung am 129.
— aus Röhren 129, 191, 226, 230, 241, 280.
— solide 161, 181, 203, 226, 230.
— versenkte 238.
— Wickelung zum Eintauchen des 210.
— Wirkung eines 188.
— Wirkung von geraden 77.
Kernenden, feste Eisenmassen auf den 124.
Kilowatt 384.
Klingeln, elektrische, 258, 278, 279, 280, 282, 284, 286, 332.
— — von Jolin 332.
— von Wagener 279.
— für Wechselströme 258, 278.
— schwingende 284.
Korn, Einfluss des Korns von Stahl auf den Dauermagnetismus 344.
Kraft, Berechnung der erregenden 114, 225, 385.
— Einheit 378, 379.
Kraftlinien 37, 60, 66, 71, 110, 115, 118, 243, 261, 268, 269, 303, 381, 385, 393, 394.
— Aufnahmefähigkeit für 161, 162.
Kraftlinien, Ausbreitung im Zerstreuungsfelde 152.
— grösste Dichtigkeit 137.
— Einheit der 381.
— nützliche 151.
— verlorne 152.
Kreisförmiger Elektromagnet 52.
Kreislauf in einem Elektromagnet 92.
Kreisläufe der Magnetisirung 87.
Kreisstrich 355.
Kugel, Verhalten einer auf der Polfläche 137.
— — längs einer Spule 245.
Kupferdämpfer 242.
— Draht, Dicke 111, 112.
— Hülse 330, 332.
— Leitungsfähigkeit 54.
— Masse, Einwirkung eines Elektromagnetes auf eine 294, 298.
— Ring, Einwirkung 298.
— Scheiben zwischen Polen 242.
— Verbrauch 181, 189, 332.
Kuppelung von Achard 275.
— magnetische 242, 267, 275.
— von Willans 267, 277.
— von Wynne und Raworth und Brush El Eng Co. 275.
Kurzschluss, des Elektromagnetes 291.
— Klingel 280, 286.
— Methode 331, 332.
— zur Verhütung von Funken 285.

L.

Ladungsfähigkeit, Einheit der 381.
Lagen, Isolation der 57.
Lagern, Einfluss des, auf den Verlust an Magnetismus 358.
Latenz eines Apparates 207, 208, 284.
Lebaillif's Paar 368.
Leistung, Einheit der 383.
Leiter, magnetisches Feld eines 398, 401, 402.
— im magnetischen Felde 43, 303, 381.
— Querschnitt des 55.
— mit Selbstinduction 306.
Leitungsfähigkeit 55, 144, 152, 169, 187, 385, 389, 390.
— von Kupfer 54.

Digitized by Google

Leitungsmaterial für die Wickelung 54.
Lichtbogen, elektrischer 325.
Linienintegral 396.
Luft, Durchlässigkeit 103.
— magnetischer Widerstand 144, 155, 157, 161, 162, 165, 226, 230, 310.
Luftzwischenraum im magnetischen Kreise 74, 81, 92, 96, 120, 125, 143, 145, 147, 151, 152, 157, 159, 160, 172, 187, 206, 324, 388, 406, 408, 411.
Lufttemperatur, Einfluss der auf die Beständigkeit 357.

M.

Magazine 366,
Magnete, Behandlung der 366.
— Beständigkeit der 350, 355.
— sich drehender 242.
— einschenkeliger 47. 189.
— als Gegenkraft 241.
— Gewicht 112, 188.
Magnete, Hebekraft von 363.
— von Hookham 359.
— von Joule 108, 109.
— Pol, Leistung eines 378.
— röhrentörmiger 359.
Magnetische Durchlässigkeit 60, 63, 75.
— — Messmethoden 63.
— Einheit 37, 376, 391.
— Feld 39, 43, 73, 74, 81, 83, 91, 133, 174, 196, 218, 222, 225, 232, 235, 239, 242, 243, 263, 28', 299, 302, 305, 325, 328, 353, 381, 385, 393, 395, 396, 397, 399, 401, 403, 404.
— — Bewegung eines 242.
— — bewegliche Spule im 262.
— — Bewegung einer Kupferscheibe im 299.
— — Darstellung von Faraday 394.
— — Energie im 405.
— — eines Leiters 398, 401, 402.
— — mehrere Leiter im 303.
— — Magnetisirung von Eisen im starken 355.
— — in einem Solenoid 397.
— — Wirkung auf eine Eisenkugel 235.
Magnetische Induction 40, 61, 93, 105, 108, 114, 243.
— Kraft, Grösse der 42, 145, 157, 167, 218.
— Kreis 92, 93, 95, 97, 125, 148, 162, 184, 186, 190, 202, 219, 232, 237, 249, 388, 408.
— — geschlossener 162, 163, 178, 206, 210, 237.
— — Grundgesetz 100, 109, 125, 148, 165.
— Leistung 177.
— Material für die Kerne 54.
— Moment 160, 161.
— Sättigung 61.
— Schirm 304.
— Schwerpunkt 140.
— Spiegelung 398.
— Stromkreis, Berechnung des magnetischen Widerstandes 387.
— Strömung 40, 45, 95, 101, 110, 124, 143, 151, 153, 155, 177, 184, 243, 245, 258, 268, 269, 284, 298, 309, 327, 385, 386, 389, 396, 402, 408.
— Wachsthum 94.
— Widerstand 101, 103, 110, 118, 127, 144, 145, 152, 156, 185, 191, 387, 389, 413.
— — Berechnung des 151.
Magnetisirende Kraft, Ausgleich der 332.
— — abhängig von der Länge des Kernes 159.
— — Berechnung 387, 388.
— — Linienintegral 396.
Magnetisirung, Anfängliche 257, 259.
— Curve 62, 69, 70, 73, 74, 80, 82, 83, 86, 89, 92, 99, 108, 134, 161.
— Fähigkeit 80, 122, 161.
— Grenze der 73.
— Methoden 352.
— specifische 342, 349, 358.
— durch elektrischen Strom. 352.
Magnetismus, Ansteigen und Abnahme 210.
— freier 121.
Magnetomotorische Kraft 41, 101, 155, 160, 177, 243, 387, 397.

Digitized by Google

Magnetomotorische Methode 63.
Material zur Herstellung 54, 352.
Maximalwerth der Stromstärke 308.
Methode von Aepinus 355.
— du clou 121.
— von Hoffer 353.
— „ Jamin 122.
— „ Knight 355.
— „ Vom Kolke 122.
— „ Lamont 122.
— „ Michell 355.
— „ Plücker 119.
— „ Sayers 217.
— „ von Swinburne 71.
— „ Tyndall 122.
— „ van der Willigen 353, 364.
Mitismetall 74, 188.
Mittlere Stromstärke 307.
Molecularmagnet 98.
Moment, magnetisches 343, 357, 368.
Morseapparat 201.

N.

Nebeneinanderschaltung von Drähten 174.
— von Spulen 198, 200, 203, 210, 232.
Nebenschliessungen, magnetische 267.
Nebenschluss, Condensator im 329.
— Fernsprecher mit magnetischem 268.
— Spule als 173.
— Vergrösserung der Empfindlichkeit durch einen 269.
— Wickelung 237.
— von geringem Widerstande 331.
— mit hohem Widerstand 329.
— Windung im 331.
Neef'scher Hammer 283.
Neusilber, Leitungsfähigkeit 55.
Neutraler Theil des Magnets 97.
Nietenstahl 342.
Nietmaschinen von Rowan 322.
Nobili's Paar 368.
Normaluhr 267.
Normalwiderstände 383.
Notenaufzeichnung 252.

O.

Oberfläche des Kerns 162.
— polare 113, 114, 165, 394.
Oberfläche, Wärmeausgabefähigkeit der 171.
— Dichtigkeit 37, 121, 395.
— Verteilung des Magnetismus auf 121, 215, 229, 395, 406.
Ohm 377, 383.
Ohmsches Gesetz 382.
Ortsstromkreis 291.

P.

Pendel, elektromagnetische 282, 290.
Phasen elektrischer Ströme 295, 409, 410.
— Verzögerung der Ströme 306, 307.
Phonopore 292, 332
Pianoforte-Stahldraht 341.
Pilsenbogenlampe 229, 233.
Pistole, magnetische 254.
Pol-Ansätze bei Hufeisenmagneten 166.
— Untersuchung von Du Moncel 166.
— Abstand, Anordnung von Nicklès 163.
— Wirkung des 163, 187.
— Berührung mit dem Anker 108.
— Centraler 263.
— Einheit 37, 393, 394, 397, 400, 403.
— — Zahl der magnetischen Kraftlinien 394.
— Fläche 35, 98, 113, 133 140, 145, 150, 241, 249, 250, 363.
— convexe 116.
— Verhalten einer Kugel auf der 137.
— Vertheilung an 132, 133.
— Wirkung der Verkleinerung 116, 120.
— Kraft auf einen 377.
— Leistung eines 378.
— Schuh, ringförmiger 263.
— Schutz durch Kupferdämpfer 242.
— Stärke, Einheit der 378, 379, 381.
— Stück u. Schuh 124, 125, 126, 127, 163, 164, 180, 190, 205, 209, 249, 250, 251, 260 263, 265, 268, 277, 288, 319, 343, 355, 359, 362.
— Verstärkung 219.
Polarisirter Anker 256, 257, 258.
— Apparate 209, 241, 255, 256.
— Relais 259.
— Wecker von Abdank 259, 278.
— Zeichengeber 280.
Polarität 34, 140, 180, 235, 305, 362.

Digitized by Google

Polarität, Wechsel der magnetischen 305.
Pole 35, 44, 95, 97, 116, 119, 140, 145, 165, 187, 215, 229, 249, 256, 259, 260, 263, 268, 273, 279, 284. 285, 299.
— Abrundung der 118.
— Gesetz der Abstossung 379.
— Entmagnetisirende Wirkung der, auf sich selbst 95.
— flache 119, 165.
— fortlaufende, spiralige 274.
— inducirte 145.
— Kupferscheiben zwischen den 242.
— zugespitzte 119.
Potentialdifferenz, magnetische 155, 389.
Probekugel 222, 235.
Probestück 121, 343, 354.
Punktpole 138, 141, 142, 215, 391.
— Gegenseitige Wirkung von zwei 391
— Wirkung eines auf ein Stromelement 391, 392.

Q.

Quadrate, Gesetz der umgekehrten 138, 215, 391.
Quadratur, Ströme in 296, 298, 299.
Quadrant 384.
Querschnitt, Berechnung des erforderlichen für eine gegebene Tragkraft 386.
— Berechnung der Aufnahmefähigkeit eines Kernes von gegebenem 386, 389.
— Fäche des Drahtes 182.
— Vergrösserung des 147, 180.
— Wirkung der Gestalt des 162.

R.

Radio-Micrometer von Vernon Boys 262.
Raum für die Umwindungen 170.
Regel von Bernoulli 113, 363, 365.
Regel von Maxwell 35, 305, 309.
Regulator von Langdon-Davies 292.
Relais 195, 203, 205, 259, 262, 265, 266, 268, 306.
— von d'Arlincourt 268.
— der Britischen Telegraphen-Verwaltung 203, 206.
Relais, Postoffice Normal A 195, 203. 259.
— von Siemens 205, 259, 262, 265.
— von Varley 266.
Remanenz 340, 345.
Repartiteur von Houdin 247.
Ring von Elias 353.
— Anker 317.
— förmiger Polschuh 263.
— Methode 64, 71.
— Magnet 95, 96, 143, 162.
Röhre, gespaltene 233.
— Kern aus 129, 191, 226, 230, 241, 280.
Röhrenförmiger Magnet 359.
Röhrenförmige Spule 218, 219, 226, 234, 236, 238, 239, 240, 242, 245, 253, 259, 265.
— — Anziehung auf Eisenkerne 226.
— — Berechnung der magnetisirenden Kraft 218, 219.
— — Wirkung 217, 218, 221, 226.
Röhrenwickelung 215.
Rückstand, Beseitigung des magnetischen 97.
— Betrag des magnetischen 160.
Rückstandswerth für Schmiedeeisen 355.

S.

Sättigung 19, 111, 134, 144, 157, 161, 174. 220, 225, 230, 359, 363, 388, 408.
Scheibentelegraph von Cowper und Robertson 253.
Scheidewände 175, 234.
Scheidungsapparate 271.
— der Brush El. Eng. Co. 271.
— von Chase 274.
— „ Chenot 271.
— „ Conkling 273.
— „ Moffat 274.
— „ Holroyd Smith 272.
Scheinbarer Widerstand 305, 307.
— — Berechnung 306.
Schirmwirkung durch Eisen 304, 367.
Schleifcontacte 272.
Schloss, elektromagnetisches 252
Schnellarbeitende Elektromagnete 184, 192.
Schutz durch gegenseitige Induction 330.

Digitized by Google

Schwingender Draht von Marsh 282.
Schwingende Hebel 241, 283.
— — von Dal Negro und Henry 283.
Schwingende Theile, Apparate mit 241, 264, 282.
Schwingende Vorrichtung für Inductionsspulen 286.
Schwingung, Wirkung der 82.
Schwingungsmethode 354,
Selbstinduction 94, 191, 192, 193, 194, 197, 198, 201, 289, 305, 307, 311, 325, 329, 331, 385, 408, 409, 410.
— Angaben von Preece 202.
— Ausgleich der 333.
— Coefficient der 306. 325, 327, 332, 385, 410, 413.
— Einheit der 306, 384.
— Trägheitswirkung der 306.
— hemmende Wirkung der 329, 385, 409, 411, 412.
Sender von Gray 291,
Senkrechtes Paar astatischer Nadeln 368.
Sideroscop 368.
Silberniederschlag 380.
Siphon-Recorder von Sir W. Thomson 262.
Solenoid 211, 231, 397, 398.
Spannung, hohe 59, 175.
— Wirkung der 81, 175.
Spannungsmesser 382.
Specifische Magnetisirung 342. 349, 358.
Spiral Elektromagnet 53.
Spiralförmiger Leiter, Magnetisirende Kraft 396.
Spule 110, 144, 161, 167, 201, 211, 223. 228, 231, 241, 242, 268.
— abgeschlossene 236, 241, 305.
— abgetheilte 234.
— — mit Kern zum Eintauchen 234.
— bewegliche im magnetischen Felde 262.
— zum Eintauchen 232, 234.
— Erwärmung der 170, 171, 188.
— feste 240.
— Hintereinanderschaltung 198, 200, 201, 202, 232
Spule mit Kern zum Eintauchen 50, 51, 211, 212, 232, 241, 302.
— — — Versuchsangaben 225.
Spule mit Kern zum Eintauchen, Wirkungsbereich 212.
— mit festem Kern und beweglichem Kern zum Eintauchen 51.
— Nebeneinanderschaltung 198, 200, 203, 210, 232.
— als Nebenschluss 173.
— Raum 167, 197.
— Verbindung für schnellste Wirkung 198.
— Wirkung auf den Kern 222, 226.
— stossende Wirkung von 242.
Stabanker 117.
Stabmagnet 46, 116, 121, 122, 124, 142, 178, 236, 394.
Stabmethode 67,72.
Stahl, Anlassen 344, 354, 362.
— Brände, Vergleich von 340.
— Eigenschaften 341, 350.
— Einfluss des Kornes auf den Dauermagnetismus 344.
— elektrischer Widerstand 346.
Stahlmagnet, Befestigung der Kerne an einem 256.
Steg, 268.
Stimmgabeln 282, 284, 287.
— Unterbrecher 289, 292.
Strich, getheilter 355.
Strohfarbe 345.
Stromarbeit, Bestimmung der 383.
Strom, Abzweigung des 247.
— Curven 193, 195.
— Dichte 173.
— Dämpfung durch Elektromagnete 307.
— Elektromagnet für schnell veränderlichen 191.
— Element, Magnetisches Feld 395.
— Elemente, Wirkung von 391, 392, 393. 403.
— Erhöhung der mechanischen Wirkung des 261.
— intermittirender 191.
— Kreis, Unterbrechung unter Flüssigkeit 328.
— Messer von W. Thomson 235.
— — von Evershed 264.
— Phasen 295, 409, 410.
— in Quadratur 296, 298, 299.

Digitized by Google

Strom-Richtung des 35.
— Stärke 167, 170, 173, 192, 193, 195, 198, 200, 225, 306, 307, 308, 410, 413.
— — Berechnung der 306, 307.
— — Einheit der 379, 395.
— Verzögerung des 191, 196, 202, 207, 289, 306, 307.
— Wechsel, schneller 90, 191, 192, 306, 307.
— Wirkung des elektrischen 377.
Strömung des Magnetismus, Berechnung der 153.
System, Elektromagnetisches 242, 244.

T.

Tangentenboussole 379.
— als Strommesser 380.
Tangentialzug 277, 278.
Tanzende Spirale von Dr. Roget 282.
Tauchereinrichtungen von Latimer Clark 321.
Telautograph von Gray 266.
Telegraphenapparate 191, 198, 201, 203, 207, 266, 282.
Telegraph, harmonischer 282, 291.
— von Sturgeon 257.
— von Wheatstone 250.
Temperatur-Berichtigung, Formel von Whipple 361.
— Coefficient von Christie, Hansteen, Riess, Moser und Cancani 361.
— Grenze 173, 177.
— der Wickelung 169, 171, 173, 174.
— Wirkung der, auf die Beständigkeit 359, 360, 366.
Theorie von Ewing 98.
Thermogalvanometer von Sturgeon 262.
Trägheit, elektromagnetische 191, 305.
Trägheit, elektrische 192.
Trägheitswirkung der Selbstinduction 306.
Tragkraft 106, 112, 122, 186, 362, 363, 386, 407.
— Berechnung des Querschnitts für eine gegebene 386.
— Berechnung des Werthes B aus der 386.
— Gesetz der 105, 121, 165, 308.
— grösste 186.
Triebmaschinen 18, 21, 213, 214, 235, 237, 282, 284, 313, 314, 315, 316, 317.
— von Breton 316.
— von Davenport 315.
— von Froment 316.
— für Gleichstrom 317.
— von Jacobi 314.
— von Pacinotti 317.
— von Page 235, 314.
— von Ritchie 313.
— von Roux 317.
— von Stevens u. Hardy 237.
— für Wechselstrom 317.
Trommelanker 318.

U.

Überhitzung 311, 312.
Übersättigung eines Magnetes 84, 353.
Uhren, elektrische 259, 267, 282, 285, 290.
— — von Hipp 259, 290.
— Entmagnetisiren von 95.
— von Wheatstone, Bain, Houdin, Froment, Détouche 290.
Umkleidung, Wirkung der 130.
Umlaufende Theile, Apparate mit 242, 264.
Umschalter, schnappende 324, 328.
Unipolare Magnete 366.
Unmagnetisches Material am Anker 98.
Unterbrecher von Foucault, Spottiswoode u. M. Deprez. 287.
— von Froment 283.
— für Inductionsspulen 282, 286.
Unterbrechung des Stromkreises im magnetischen Felde 328.
— unter Flüssigkeit 328.
Untersuchungen von Betz 197.
— von Bidwell 71, 72, 73
— von W. Brown 358.
— von Cheesman 347, 357.
— von Ewing 37, 62, 64, 73, 74, 78, 79, 86, 87, 91, 94, 341, 343, 347, 354.
— von Gray 355.
— von Hughes 163, 192.
— von Joule 17.
— von Lamont 356.

Digitized by Google

Untersuchungen von Scoresby 362.
— von Strouhal u. Barus 348, 358.
Untersuchungsmethode von Rowland 123.
Untersuchungsspule 107, 148, 185.

V.

Verbindungsstellen, Wirkung von 78, 116.
— — des Druckes auf 80, 81.
Vergleichung von Elektromagneten 177.
Verlust an Energie 167. 412.
— an Magnetismus, Ursachen des 355.
— magnetischer Kraftlinien 146.
— durch Wärmebildung 173.
Verminderung der magnetischen Strömung 151.
Verschwindender Magnetismus, Curven des 210.
Versuche von Bosanquet 64, 66, 67, 107, 356.
— von Bruger 227, 229.
— von Dub 119, 125, 127, 163, 226.
— von Du Moncel 129, 161, 163, 189.
— von v. Feilitzsch 161, 226.
— von Henry 9, 15, 256.
— von Hopkinson 341, 343.
— von Joule 17, 161.
— von King 29.
— von Vom Kolke 133, 135.
— von Moser 354.
— von Nickles 270.
— von Preece 202, 343.
— von de la Rive 45.
— von Rowland 64, 65.
— von Sturgeon 2, 147, 161, 256.
— von El. Thomson 299, 304.
— von von Waltenhofen 162, 226.
Vertheilung von Kraftlinien 133.
— des Magnetismus 121, 132, 133, 215, 229, 395, 406.
— polare 140.
Verwendung im Allgemeinen 33, 97.
Verzögerung des Magnetismus 207.
Vielfache Wickelung, Methode der von Langdon Davies 332.
Volt 377, 382.
Volt-Ampère 384.
Voltmeter 330, 382.
— Abschaltung mit einem 330.
Voltameterzellen im Nebenschluss 330.

W.

Wagner'scher Hammer 283.
Wärmeausgabefähigkeit der Oberfläche 171.
Wärme, Beseitigung der 174.
— entwickelte 326.
— nutzlose 87.
— Wirkung auf den Magnetismus 360.
— Wärmeverbrauch 168, 169.
Watt 384.
Wechsel des Magnetismus 298, 299, 311.
Wechselndes magnetisches Feld 303.
Wechselstrom 95, 191, 233, 241, 242, 258, 259, 274, 278, 292, 305, 308, 407.
— Elektromagnet für 293, 294, 308, 407.
— Spannung 311.
— Wellenbewegung 295.
Wechselstrommaschinen 259, 317, 318.
Wecker 17, 178, 188, 190, 201, 258, 278, 284.
— Anzeigeapparate für 278.
— in Glockenform 190.
— von Jensen 190.
— polarisirte 259, 278.
— schwingender von Mirand, Siemens & Halske und Lippens 283, 284.
— für Wechselstrom 258.
Weg, nützlicher 152, 159.
Wellen des Wechselstromes 306.
Wellendiagramme von Wechselströmen 295.
Werkzeugmaschinen 320.
Whitworth-Stahl 341.
Wickelung in Abtheilungen 175.
— Arten der 174.
— beste 179.
— von Brisson 176.
— der Drahtspulen 110, 159, 162, 164, 167, 197, 398.
— mit vielfachem Draht 175.
— von Du Moncel 179.
— zum Eintauchen des Kernes 211.
— mit dem Kern zum Eintauchen, Gesetz 215.
— konische 231.

Digitized by Google

Wickelung, kurze 168, 398.
— lange 168.
— — röhrenförmige 404.
— von Lyttle 176.
— Masse der 182.
— Regeln für die 173.
— von Ritchie 175.
— von Serrin 175.
Wickelung für gleichbleibende Spannung 172.
— für gleichbleibende Stromstärke 173.
— Wirkung der Ausdehnung 178.
— Wirkung der Lage 179.
Widerstand, Abschaltung durch einen 328, 330.
— der Batterie 177.
— Einheit des 381.
— des Elektromagnetes 177, 182, 231.
— gegen die magnetische Strömung 78, 97, 151, 165, 196, 231, 310.
— scheinbarer 191, 200, 305, 306, 307, 413.
— des Stromkreises 169, 191, 192, 289, 307, 325.
Windungen aus Eisen 187.
— Raum für die 170.
— Zahl der 167, 171, 173, 182, 197, 198, 217, 225, 309, 327, 385, 410.
Winkelverzögerung 307.
Wirbelströme 94, 99, 191, 196, 207, 293, 298, 301, 302, 303, 304, 305, 311, 327, 366.
Wirkung, Batterieschaltung für schnellste 199.
— Empfindlichkeit der 259.
— Geschwindigkeit der 259.
— grösste 177.
— auf Kupfermassen 298.
— schnellste 164, 192, 198, 199, 207, 305.
— der Selbstinduction 309, 310, 311, 330, 385, 409, 411, 412.
Wirkungsbereich 212, 229, 234, 236, 239.
Wirkungsbereich, Angaben von Hunt 213.
— eines Elektromagnetes 212, 236.
— Methoden zur Erweiterung des 230.
Wolframstahl 341, 342, 344, 359.

Z.

Zahngetriebe, elektromagnetische 266.
Zahn-Kuppelungen 242.
Zeichengeber, polarisirte 280.
— von Thorpe 280.
Zeigerwerk von Gent 281.
Zeitconstante 195, 198, 199, 201, 207, 299, 325, 332.
Zerstreuung 103, 115, 116, 126, 134, 140, 146, 148, 150, 151, 152, 159, 162, 164, 172, 178, 184, 387, 389, 413.
Zerstreuung, Beziehung der Anziehung zur 147.
— Coefficient der zulässigen 152, 385, 389.
— Curve der 150.
— Grösse der 146, 148, 151.
— Schätzung nach Forbes 389.
— Untersuchung der 147.
Zerstreuungsfeld, Ausbreitung der Kraftlinien im 152.
Zertheilter Elektromagnet 307.
Zinkenstand 289.
Zug, Messung des 213.
Zugkraft 71, 73, 108, 113, 115, 117, 120, 124, 134, 186, 190, 213, 215, 363, 407, 408, 412.
Zugkraft, Formel von van der Willingen 365,
— Gesetz der 261.
Zurückbleibender Magnetismus 70, 82, 84, 95, 97, 99, 160, 203, 204, 260.
Zurückhalten des Magnetismus 269, 340, 345.
Zweigwiderstände, Abhandlung von Preece 202
Zwischenraum im magnetischen Kreise 269.

Hofbuchdruckerei C. A. Kaemmerer & Co., Halle.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Universitätsbibliothek Basel
0UBU0550484

Digitized by Google